

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Vliv tepelného zpracování na rychlost šíření ultrazvuku
v oceli S355J0

Effect of Heat Treatment on Ultrasound Propagation Rate
in Steel S355J0

Student: Bc. Roman Chmiel

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Roman Chmiel**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**
Téma: **Vliv tepelného zpracování na rychlost šíření ultrazvuku v oceli S355J0**
Effect of Heat Treatment on Ultrasound Propagation Rate in Steel S355J0
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teoretickou studii týkající se ultrazvuku včetně vlivu prostředí na rychlost šíření ultrazvukových vln.
2. Zpracujte studii na téma teorie tepelného zpracování.
3. Popište stávající situaci při výrobě etalonů pro NDT, způsob řešení neshodných kusů.
4. Proved'te návrh tepelného zpracování neshodných výrobků a návrh destruktivních zkoušek.
5. Posuďte ekonomiku návratu neshodných kusů do výroby úpravou jejich tepelného zpracování.
6. Vyhodno'tte dosažené výsledky a vyslovte závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

JECH, J. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4. vyd. Praha: SNTL, 1983, 342 s.
MAZANCOVÁ E. *Technické materiály I*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava. 1. Vydání. 2012, 151 s., ISBN 978-80-248-2577-9
Kolektiv autorů. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování* Ostrava: ZEROSS. 2000. 212 s. ISBN 80-85771-72-1

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o výrobě a zkoušení polotovarů kalibrační měrky od firmy Strojírny a stavby Třinec, a. s., firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 20. května 2019.



.....

Podpis studenta


Prohlášení spolupracující osoby

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 6, odst.9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských studijních programech VŠB-TU Ostrava.

Spolupracující firma: Strojírny a stavby Třinec, a. s.

Jméno a příjmení oprávněné osoby: Ing. Roman Pustówka

V Ostravě dne 20. května 2019.

 **STROJÍRNY A STAVBY**
TŘINEC, a.s.
Průmyslová 1038, Staré Město,
739 61 Třinec -3-

.....

Podpis oprávněné osoby
(případně razítko)

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019

.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Roman Chmiel

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nýdek 19, 739 95 Nýdek

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CHMIEL, R. Vliv tepelného zpracování na rychlost šíření ultrazvuku v oceli S355J0: *diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2019, 92 s. Vedoucí práce: Mohyla P.

Diplomová práce se zabývá vlivem tepelného zpracování ocelových výkovků z materiálu S355J0 na rychlost šíření ultrazvukových vln. V úvodních dvou kapitolách jsou popsány základy ultrazvuku a tepelného zpracování ocelí. Další kapitola se věnuje popisu výroby polotovarů kalibračních měrek, kontrole a parametrům pro uvolnění vyhovujících kusů. V praktické části se práce soustředí na možnost opravy neshodných kusů a navrácení zpět do výrobního procesu. Experiment je postaven na různém stadiu tepelného zpracování vzorků. Tepelně zpracovány jsou 3 vzorky s nevyhovující rychlostí, jeden vzorek je ponechán v původním stavu. Všechny čtyři vzorky jsou následně porovnány s plně vyhovujícím materiálem. Na základě dobrých experimentálních výsledků je možné tepelným zpracováním upravit rychlost šíření příčných ultrazvukových vln.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

CHMIEL, R. Effect of Heat Treatment on Ultrasound Propagation Rate in Steel S355J0: *Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2019, 92 p. Thesis head: Mohyla P.

The Master Thesis deals with the influence of heat treatment of steel forgings from material S355J0 on the speed of ultrasonic wave propagation. In the introductory two chapters, the basics of ultrasound and heat treatment of steels are described. The next chapter is devoted to the description of the production of calibration gauges, inspection and parameters for the release of suitable pieces. In the experimental part, the thesis focuses on the possibility of repairing nonconforming pieces and returning them to the production process. The experiment is based on various stages of heat treatment of samples. Three samples with unsatisfactory speed are heat treated, one sample is left in its original state. All four samples are then compared to fully compliant material. On the basis of good experimental results, the rate of transverse ultrasonic wave propagation can be corrected by heat treatment.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	11
Úvod.....	12
1. Teorie ultrazvuku.....	13
1.1 Základní pojmy	13
Ultrazvuk.....	13
Kmitání netlumené	13
Kmitání tlumené.....	14
Amplituda kmitání.....	14
Impuls.....	15
Doba kmitu a frekvence kmitání	15
Vlnová délka	15
Rychlost šíření ultrazvukového vlnění	16
1.2 Typy ultrazvukových vln.....	17
Podélná vlna (L-Longitudinální).....	17
Příčná vlna (T - Transversální).....	18
Rayleighova vlna.....	18
Lambova vlna.....	19
1.3 Metody zkoušení ultrazvukem.....	20
Metoda průchodová.....	20
Metoda impulsová odrazová	20
1.4 Zdroje ultrazvukových vln.....	21
Piezoelektrické měniče.....	21
Magnetostrikční měniče	22
1.5 Akustická vazba	23
Vazba kontaktní.....	23
Vazba mezerová	23
Vazba imerzní	23

1.6	Ultrazvukový defektoskop	24
1.7	Ultrazvuk v různých prostředích	25
	Ultrazvuk v tuhých látkách	25
	Ultrazvuk v kapalinách.....	27
	Ultrazvuk v plynech	27
1.8	Měření rychlosti šíření ultrazvuku.....	28
	Měření při spojitém vysílání	28
	Impulsová měření.....	28
2.	Teorie tepelného zpracování oceli.....	31
2.1	Metastabilní rovnovážný diagram Fe-Fe₃C	31
2.2	Rozpad tuhého roztoku	33
	Rozpad austenitu při konstantní teplotě	33
	Rozpad austenitu při klesající teplotě.....	34
2.3	Rozpad austenitu – vzniklé struktury	34
	Perlit	34
	Bainit	35
	Martenzit	36
2.4	Rozdělení tepelného zpracování	37
	Normalizační žíhání	37
	Žíhání na odstranění pnutí.....	37
	Kalení	37
	Popouštění	38
3.	Stávající situace ve výrobě etalonů, řešení neshodných kusů	39
3.1	Požadavky zákazníka	40
	Znění objednávky.....	40
	Materiál	41
	Tepelné zpracování	41
3.2	Výroba.....	42

Schéma polotovaru kalibrační měrky č. 1	42
Rámcový technologický postup výroby	42
Tepelný předpis	45
3.3 Kontrola	45
Rozměrová kontrola	45
Měřidla	47
Měření drsnosti opracovaných ploch	47
Měření rychlosti ultrazvukových vln	49
Metodika měření	50
3.4 Uvolnění výkovku	51
3.5 Neshodné kusy a jejich řešení	51
4. Návrh tepelného zpracování a destruktivních zkoušek	52
4.1 Návrh tepelného zpracování vzorků	52
4.2 Dílenské měření tvrdosti	52
4.3 Realizace navrženého tepelného zpracování vzorků	55
4.4 Referenční vzorek	56
4.5 Ověření chemického složení	57
4.6 Strukturní rozbor	59
Nářezový plán	59
Značení vzorků	60
Struktura vzorku č. 1	63
Struktura vzorku č. 2	65
Struktura vzorku č. 3	67
Struktura vzorku č. 4	69
Struktura vzorku č. 5	71
4.7 Oprava 13ks polotovarů	73
5. Ekonomika návratu neshodných kusů do výroby	76
5.1 Kompletní výroba série 200ks	76

5.2	Opakované tepelné zpracování 13ks	77
5.3	Náklady na opravu 207ks	78
6.	Hodnocení výsledků	79
7.	Citovaná literatura	82
8.	Přílohy	84

Seznam použitých značek a symbolů

E	modul pružnosti v tahu	Pa
G	modul pružnosti ve smyku	Pa
KE	koncové echo	
Sa	dráha ultrazvuku	mm
SaS	Strojírny a stavby Trinec, a.s.	
T	doba kmitu	s, μ s
c	rychlost šíření ultrazvukových vln	m.s^{-1}
c_L	rychlost šíření podélných vln	m.s^{-1}
c_R	rychlost šíření Rayleighyho vln	m.s^{-1}
c_T	rychlost šíření příčných vln	m.s^{-1}
c_x	neznámá rychlost šíření ultrazvukových vln	m.s^{-1}
d	tloušťka zkoušeného vzorku	mm
d_m	vzdálenost odečtená z přístroje při kalibraci	
	časové základny	mm
f	frekvence kmitání	Hz, MHz
m	tloušťka vrstvy vazebního prostředí	mm
t	doba průchodu	s
λ	vlnová délka	mm
λ_L	vlnová délka podélné vlny	mm
λ_T	vlnová délka příčné vlny	mm
μ	Poissonovo číslo	[-]
ρ	měrná hmotnost	kg.m^{-3}

Úvod

Diplomová práce navazuje na moje bakalářské téma z roku 2017, ve kterém jsem se zabýval stanovením rychlosti šíření podélných a příčných ultrazvukových vln v materiálu výkovků S355J0. Tato práce byla zaměřena na metodiku měření rychlostí ultrazvuku v materiálu a statistické vyhodnocení měření výrobní dávky polotovarů výkovků kalibrační měrky číslo 1 dle ČSN EN ISO 2400. Na základě výsledků měření byly výkovky roztrženy na kusy uvolněné k expedici zákazníkovi a kusy neshodné, které byly označeny jako „NESHODA“ a následně určeny k sešrotování. V diplomové práci se budu věnovat těmto nevyhovujícím výkovkům a moje snaha bude zaměřena na to, zda by bylo možné tepelným zpracováním upravit nevyhovující rychlosti šíření ultrazvuku v materiálu.

V první kapitole popíšu princip a fungování ultrazvukové metody, od základních pojmů až k metodice měření rychlosti ultrazvuku v materiálu.

Ve druhé kapitole se věnuji teorii tepelného zpracování oceli, ve které popíšu základní vlastnosti kovů, základy tepelného zpracování ocelí a tepelné zpracování použité při výrobě kovaných polotovarů kalibrační měrky č. 1.

Kapitola třetí bude věnována stávající situaci ve výrobě výkovků z jakosti S355J0. Od požadavků zákazníka, přes technologický postup až po kontrolu výkovků. Popíšu zde postup řešení neshodných kusů.

V kapitole čtvrté budu pracovat na praktické části experimentu. Ten bude zaměřen na výběr výkovků pro samotný experiment, na návrh tepelného zpracování vzorků, dílenské měření tvrdosti na tepelně zpracovaných vzorcích. Nejdůležitějším úkolem bude měření rychlostí ultrazvuku v materiálu po dílčím tepelném zpracování jednotlivých vzorků výkovků spojené s jejich metalografickým rozбором.

Kapitola pátá se bude opírat o výsledky experimentu v předchozí kapitole. Pokud se podaří experimentem dokázat, že opětovným nebo pozměněným tepelným postupem bude možné upravit rychlost šíření ultrazvuku v materiálu, uvedu v této kapitole ekonomický význam návratu neshodných výkovků zpět do výroby.

V závěrečné kapitole budou shrnuty všechny poznatky z výroby a také z experimentu, včetně ekonomického přínosu této práce.

1. Teorie ultrazvuku

1.1 Základní pojmy

Ultrazvuk

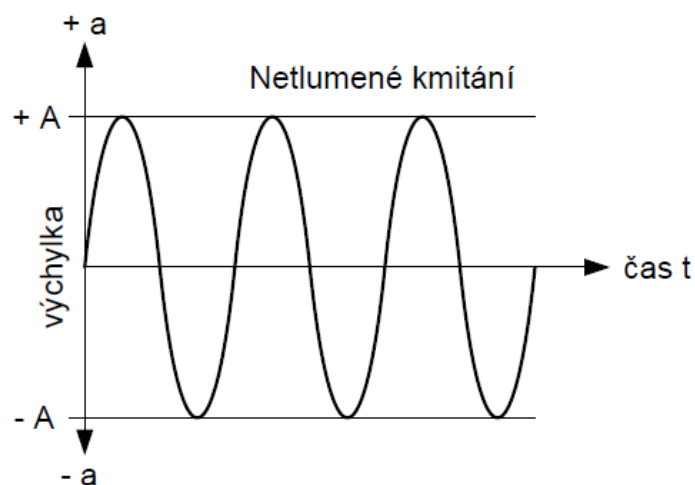
Ultrazvuk definujeme jako zvukové vlny o frekvenci vyšší, než je schopno vnímat lidské ucho. Aby se tyto vlny dostaly ze svého zdroje k přijímači či odražeči, musí se šířit prostředím alespoň částečně elastickým. Tuto podmínku splňuje prostředí pevné, kapalné a plynné. Ultrazvukové vlnění vychyluje částice prostředí ze svých rovnovážných poloh i přesto, že mezi nimi působí soudržné síly, a přenáší tento pohyb na okolní částice. Při samotném pohybu nedochází k přenosu hmoty ozvučeného materiálu. Navenek se tento efekt projevuje vlnou, která se prostředím šíří určitou rychlostí.

Rozdělení zvuku podle frekvence kmitání¹:

- | | |
|-------------|---|
| ➤ infrazvuk | pod 20 Hz, |
| ➤ zvuk | 20 Hz až 20 kHz (slyšitelný zvuk), |
| ➤ ultrazvuk | nad 20 kHz (oblast využití v defektoskopii), |
| ➤ hyperzvuk | nad 100 MHz. |

Kmitání netlumené

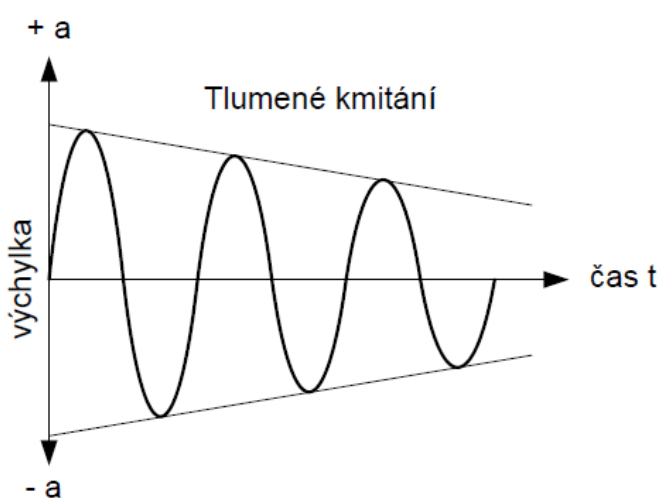
Při vychýlení atomu nebo molekuly ze své rovnovážné polohy předávají svou energii sousedním částicím. Prostředí, ve kterém k tomuto předávání energie dochází klade tomuto pohybu odpor. Aby bylo možné zajistit konstantní výchylku kmitu částic, musíme částicím dodat energii spotřebovanou prostředím.



Obrázek 1 Netlumené kmitání¹

Kmitání tlumené

V případě, že nebudeme dodávat energii pohlcovanou prostředím, amplituda kmitání bude klesat do té doby, než se úplně zastaví.



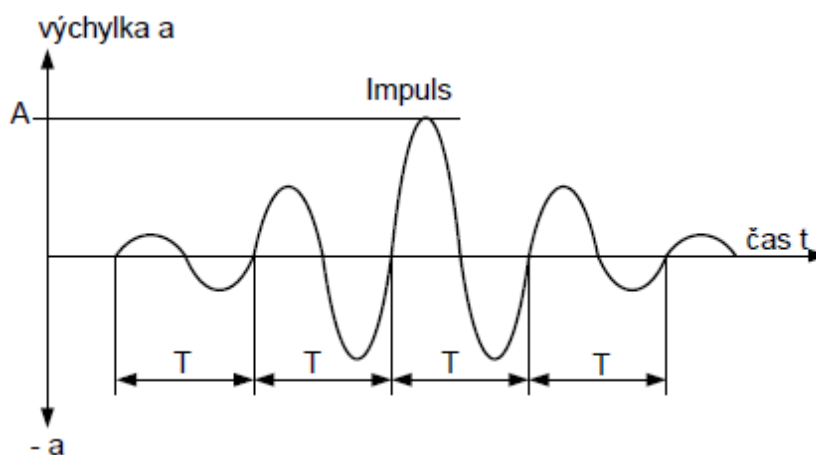
Obrázek 2 Tlumené kmitání¹

Amplituda kmitání

Amplitudou kmitání nazýváme maximální výchylku periodicky se měnícího kmitu. Během jednoho periodického cyklu nabývá amplituda dvakrát svého maxima – jednou ve své kladné části, podruhé v části záporné.

Impuls

Nazýváme tak kmit vybuzený měničem sondy. Jeden nebo více kmitů má totožnou dobu kmitu T .



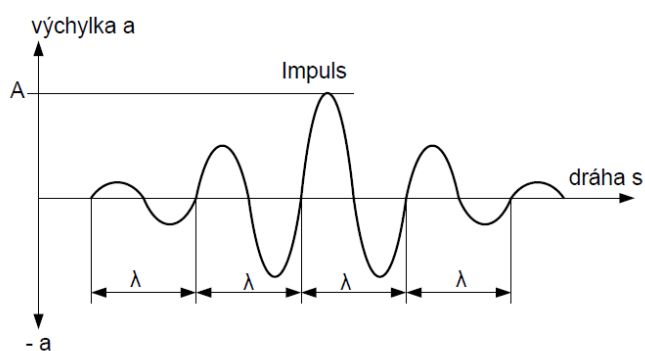
Obrázek 3 Ultrazvukový impuls¹

Doba kmitu a frekvence kmitání

Doba kmitu T odpovídá času, po kterém se periodický děj opakuje. Převrácená hodnota doby kmitu je frekvence. U tlumeného kmitání se může doba kmitu měnit.

Vlnová délka

Vlnová délka λ je rovna vzdálenosti (dráze ultrazvuku) během jedné doby kmitu T .



Obrázek 4 Vlnová délka¹

Rychlost šíření ultrazvukového vlnění

Rychlost šíření ultrazvuku je materiálová konstanta, která je závislá na pružnostních konstantách materiálu E , G , μ a měrné hmotnosti materiálu ρ , kde

- E je modul pružnosti v tahu,
- G je modul pružnosti ve smyku,
- μ je Poissonovo číslo.

Vztahy mezi materiálovými parametry a parametry rychlostí dává do souvislosti Regazzo¹ v následujících vzorcích:

Modul pružnosti v tahu:

$$E = \frac{4 \cdot \rho \cdot (0,75 \cdot c_L^2 - c_T^2)}{\frac{c_L^2}{c_T^2} - 1} [Pa] \quad (1-1)$$

Modul pružnosti ve smyku:

$$G = \rho \cdot c_T^2 [Pa] \quad (1-2)$$

Poissonovo číslo:

$$\mu = \frac{(0,5 \cdot c_L^2 - c_T^2)}{c_L^2 - c_T^2} [-] \quad (1-3)$$

Materiálové konstanty nejsou jediné parametry materiálu, které mají vliv na rychlost šíření ultrazvuku v materiálu. Regazzo¹ uvádí další vlastnosti materiálu, které mají nezanedbatelný vliv na rychlost šíření ultrazvukových vln:

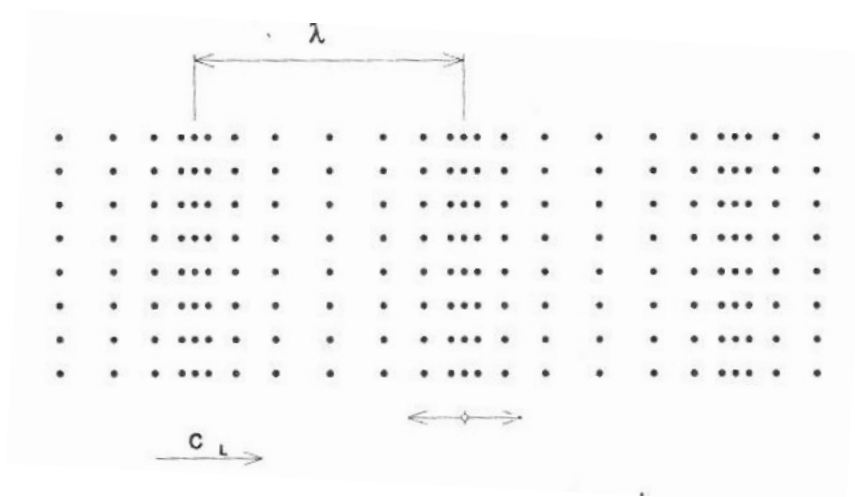
- krystalické materiály mohou ve své struktuře mít různě orientované krystaly, které díky odlišným elastickým vlastnostem v různých směrech vykazují odlišné rychlosti ultrazvuku,
- vnější a vnitřní pnutí v materiálu,
- chemické složení materiálu,
- teplota prozvučovaného materiálu.

1.2 Typy ultrazvukových vln

Druhy ultrazvukových vln rozlišujeme podle toho, v jakém směru kmitají částice hmoty vzhledem ke směru postupu vlny.

Podélná vlna (L-Longitudinální)

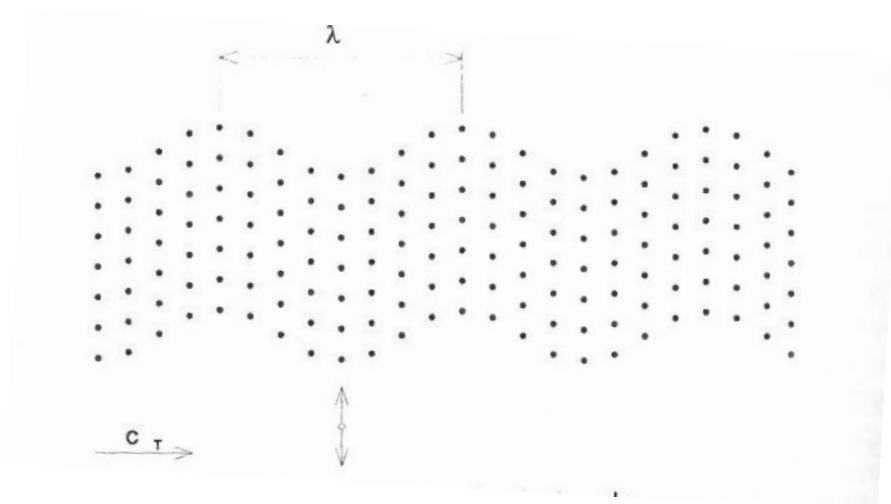
Pohybuje-li se podélná vlna, částice hmoty prostředí kmitají po dráze ve směru šířící se vlny. Tento pohyb je charakteristický střídavě se zhušťujícím a zředňujícím pohybem, při kterém vzniká tlak a tah a zároveň dohází ke změně objemu ozvučené hmoty. Podélná vlna se dokáže šířit prostředím pevným, kapalným i plynným. Musí být splněna podmínka, že prostředí musí být dostatečně velké vzhledem k délce vlny². Rychlost podélné vlny se označuje symbolem c_L .



Obrázek 5 Podélná vlna²

Příčná vlna (T - Transversální)

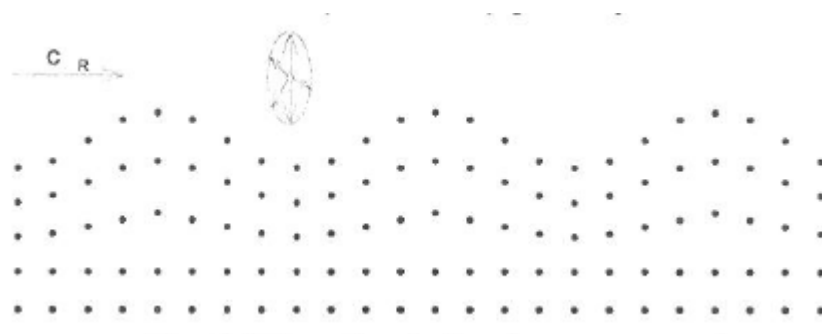
Částice ozvučené hmoty kmitají kolmo na směr šíření ultrazvukové vlny. Taková vlna se může šířit pouze v prostředí, které klade částicí odpor v namáhání ve smyku. Tato podmínka je splněna pouze v prostředí tuhém s rozměry většími, než je vlnová délka. Rychlost šíření příčné vlny se označuje c_T .



Obrázek 6 Příčná vlna²

Rayleighova vlna

Jedná se o příčnou vlnu, která se šíří na volném povrchu tuhého prostředí. Částice vlny kmitají kolem rovnovážné polohy po eliptické dráze, protože jsou ovlivňovány silou působící na směr šíření, a ta je podstatně větší než působící síla ve směru šíření. Rovina kmitání Rayleighovy vlny je kolmá k povrchu prostředí. Existence vlny je možná pouze do hloubky pod povrchem rovnající se vlnové délce příčné vlny λ_T . Rychlost šíření se označuje c_R a její hodnota dosahuje asi 0,8 až 0,9 hodnoty rychlosti příčné vlny.



Obrázek 7 Rayleighova vlna²

Lambova vlna

Lambova vlna může vznikat v materiálech, které se svými rozměry blíží vlnové délce. Příkladem takového materiálu je např. tenký plech. Částice kmitají na povrchu shodně jako u povrchové vlny. Lambovy, neboli deskové vlny se dělí na dilatační nebo ohybové. V případě dilatační vlny částice ve středu tloušťky materiálu kmitají stejně jako u podélného vlnění, kdežto u ohybové vlny jako u příčného vlnění.



Obrázek 8 Lambova vlna dilatační²



Obrázek 9 Lambova vlna ohybová²

1.3 Metody zkoušení ultrazvukem

Metoda průchodová

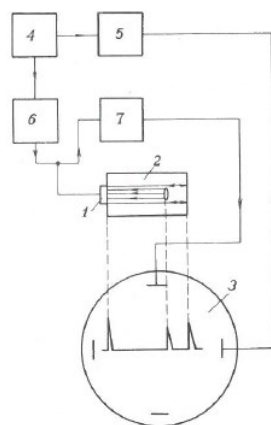
Jedná se o nejstarší metodu zkoušení ultrazvukem. Pracuje na principu měření procházejícího akustického tlaku, popř. zjišťování doby průchodu ultrazvukových vln daným prostředím. Metoda vyžaduje zapojení dvou ultrazvukových sond, kdy jedna je zapojena jako vysílač, druhá jako přijímač. Sonden musí být umístěny souose na protilehlých površích zkoumaného předmětu. Vysílací sonda vytvoří ve zkoumaném prostředí akustický tlak, který je zachycen přijímací sondou a je převáděn na elektrický signál, který je dále zpracováván elektronikou. V případě, že se v materiálu nachází vada nebo nehomogenita materiálu, akustický tlak úměrně klesne.



Obrázek 10 Zkoušení průchodovou metodou³: 1 – vysílací sonda, 2 – přijímací sonda

Metoda impulsová odrazová

Jedná se o nejpoužívanější metodu v ultrazvukové defektoskopii. Na rozdíl od metody průchodové vyžaduje pouze jednu sondu, která v procesu zkoušení zastává funkci jak vysílače, tak přijímače ultrazvukových impulsů. Sonda se přiloží na zkoumaný předmět a do prostředí začne vysílat krátké ultrazvukové pulzy, které se po odrazu od nehomogenity nebo protilehlého povrchu předmětu vrací zpět do sondy. Odrazová metoda poskytuje daleko více informací o zkoumaném prostředí než metoda průchodová. Podává informace o velikosti odrazové plochy podle výšky odraženého impulsu, hloubce odrazové plochy nebo rychlosti ultrazvukových vln.



Obrázek 11 Schéma zařízení pro impulsovou metodu³: 1 – sonda, 2 – zkoušený objekt, 3 – monitor, 4 – synchronizátor, 5 – zdroj časové základny, 6 – generátor pulsů, 7 – zesilovač

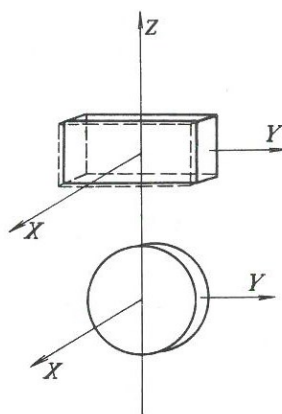
1.4 Zdroje ultrazvukových vln

Z hlediska využití v defektoskopické praxi mají největší význam jako zdroje ultrazvukových vln měniče piezoelektrické a magnetostrikční.

Piezoelektrické měniče

Piezoelektrický měnič převádí elektrickou energii na mechanickou a mechanickou zpět na elektrickou. Materiály s piezoelektrickými vlastnostmi obsahují domény uspořádané tak, že v krystalové mřížce jsou negativní a pozitivní ionty deformovány a každá doména získá elektrický dipólový moment. Tak vznikne na piezoelektrickém elementu elektrický náboj – hovoříme o *přímém piezoelektrickém jevu*. Opakem tohoto jevu je *nepřímý piezoelektrický jev*. U něj dochází k mechanické deformaci elementu v elektrickém poli. Piezoelektrické vlastnosti mají některé přirozené látky, jako např. krystaly křemenu, nebo látky umělé, např. niobát lithia a olova. V oblasti nedestruktivního zkoušení má největší význam bariumtitanát, zirkonát a niobát (keramické materiály).

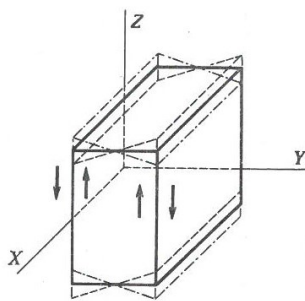
Pro vybuzení podélné či příčné vlny piezoelektrickým měničem je důležité, kterou rovinou je proveden řez krystalem a ve kterém směru se vyříznutý element deformuje.



Obrázek 12 Křemenný řez orientovaný X^3

Budeme-li působit na řez X tlakovým nebo tahovým napětím, vyvoláme na připojených elektrodách střídavé elektrické napětí. Opačným postupem – přivedením střídavého elektrického napětí na elektrody, vybudíme v destičce deformaci ve směru X a tím vyvoláme podélnou ultrazvukovou vlnu.

Pokud provedeme řez krystalem kolmo na osu Y a přivedeme střídavé elektrické napětí, vybudíme v důsledku střížné deformace příčnou a povrchovou ultrazvukovou vlnu.



Obrázek 13 Křemenný řez orientovaný Y^3

Všechny piezoelektrické měniče jsou provedeny do tvaru destičky, jejíž tloušťka je přímo úměrná jmenovité frekvenci.

Magnetostrikční měniče

Magnetostrikci nazýváme vlastnost některých materiálů, které se deformují ve vnějším elektromagnetickém poli. Změna objemu může být jednoosá nebo objemová. Měníče ultrazvukových sond vyrobené z magnetostrikčních materiálů mají stejnosměrnou předmagnetizaci, na kterou se klade střídavé elektrické pole. Tak je zaručeno, že změna

rozměrů a změna magnetického pole má lineární závislost. Magnetostrikční měniče se používají pro sondy s nízkou ultrazvukovou frekvencí určené ke zkoušení betonu, keramiky, obecně materiálů s velkým útlumem.

1.5 Akustická vazba

Pro přenos ultrazvuku ze sondy do zkoušeného materiálu nepostačuje přiložení sondy na suchý zkušební povrch. Mezi sondou a materiálem by zůstala vrstva vzduchu, která má ve spojení s tuhým tělesem koeficient odrazu blížíící se číslu² 1, do materiálu by se přenesla pouze malá část akustického tlaku vyvolaného měničem sondy. Z tohoto důvodu se musí na zkoušený povrch nanést vrstva kapaliny, která má koeficient přechodu rozhraním příznivější a přenesla část akustického tlaku ze sondy do zkoušeného materiálu. Podle tloušťky vrstvy vazebního media rozlišujeme tři typy akustické vazby – kontaktní, mezerovou a imerzní.

Vazba kontaktní

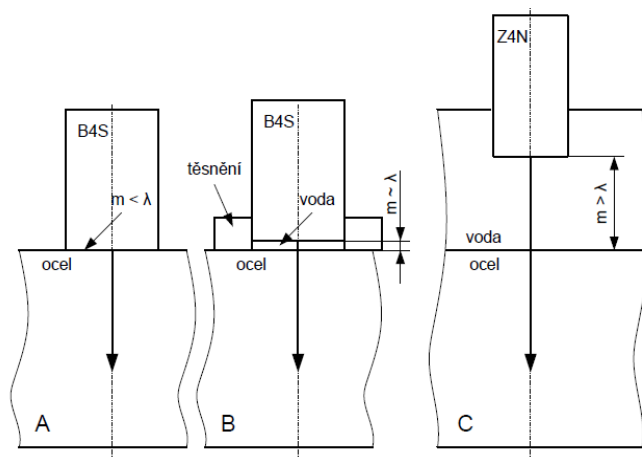
Tento typ akustické vazby má po nanesení vhodného vazebního prostředku tloušťku vrstvy mezi sondou a zkoušeným objektem nejmenší. Ideálně by tloušťka vrstvy m měla být menší, než je vlnová délka ultrazvuku λ ve vazebním prostředku ($m < \lambda$).

Vazba mezerová

Ultrazvukové vlny se přenáší ze sondy do testovaného objektu přes tenkou vrstvu m vazebního prostředku, která je přibližně rovna vlnové délce ultrazvuku λ ve vazebním prostředku ($m \approx \lambda$).

Vazba imerzní

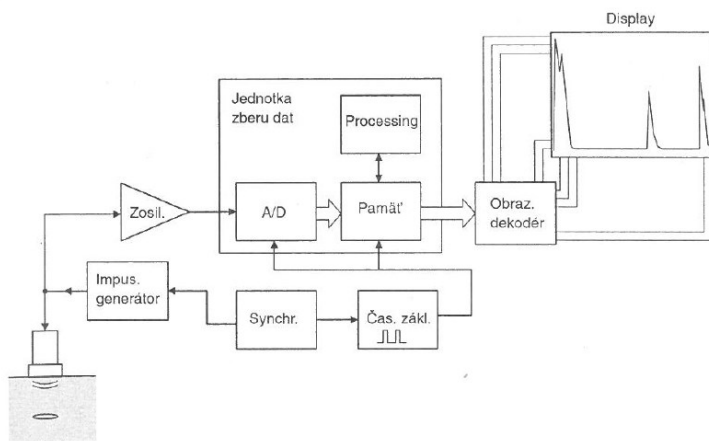
Tento typ vazby by se dal přirovnat k vazbě mezerové, avšak u vazby imerzní je mezi sondou a testovaným objektem daleko větší vzdálenost (10 mm a více). Mezera je výrazně větší než vlnová délka ultrazvuku šířící se ve vazebním médiu. Vazebním prostředkem může být voda nebo řídký olej.



Obrázek 14 Akustická vazba na akustickém rozhraní¹: A - kontaktní, B - mezerová, C - imerzní

1.6 Ultrazvukový defektoskop

Každý univerzální ultrazvukový defektoskop se skládá z několika základních technických prostředků. Umožňuje používat ultrazvukové přístroje jak odrazovou, tak průchodovou metodou. Digitální přístroje v zapojení pro odrazovou techniku zkoušení dovolují zjistit vzdálenost k defektu a velikost amplitudy akustického tlaku. Informace je zobrazena v podobě echa na přístrojové obrazovce jako časový průběh signálu.



Obrázek 15 Blokové schéma ultrazvukového defektoskopu²

Generátor pulsů – z něj jsou k sondě vysílány impulsy, které sonda převádí na ultrazvukové kmity dále se šířící do zkoušeného materiálu (prostředí)

Zesilovač – echa, která se vrací z materiálu zpět do sondy, a nesou informaci o vzdálenosti a velikosti akustického tlaku, mají malou amplitudu a musí být pro další zpracování zesílena

A/D převodník – zabezpečuje převod ech do digitální podoby, aby mohla být zobrazena na obrazovce defektoskopu

Paměť – do ní jsou ukládány vzorky signálů, které bere A/D převodník z průběhu signálu

Synchronizátor – zajišťuje konstantní polohu nulového bodu vstupního signálu (levý dolní roh obrazovky). Synchronizuje vysílané impulsy do materiálu, časovou základnu a start A/D převodníku

1.7 Ultrazvuk v různých prostředích

Ultrazvuk v tuhých látkách

Tuhé látky jsou pro ultrazvuk jediným prostředím, které je schopno přenášet všechny druhy ultrazvukových vln. Je to dáno tím, že pevné látky mohou přenášet smyková namáhání díky vyšším meziatomárním silám. Pevné látky jsou typické svou krystalickou stavbou. Polykrystalické materiály jsou složeny z velkého počtu různě orientovaných zrn. Pokud jsou navíc izotropické, můžeme říci, že rychlost šíření ultrazvuku se se směrem zkoušení nemění a je v podstatě konstantní. V případě anizotropie materiálu se s měnícím směrem zkoušení mění výrazným způsobem i rychlost šíření ultrazvuku. Závislost rychlostí na mechanických a pružnostních charakteristikách tuhých látek je uvedena v následujících vztazích:

Rychlost šíření podélných vln¹

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1-4)$$

Rychlost šíření příčných vln¹

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1+\mu)}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1-5)$$

Pro zvolený materiál a druh vlnění je rychlost šíření konstantní. V tabulce uvádím několik příkladů rychlostí šíření ultrazvuku pro vybrané materiály.

Tabulka 1 Rychlosti šíření ultrazvuku v kovech²

Kov	Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Poissonovo číslo μ [-]	Rychlost podélných vln c_L [m.s ⁻¹]	Rychlost příčných vln c_T [m.s ⁻¹]
ocel feritická	7800	0,28	5920	3250
ocel austenitická	8030	0,27	5200 až 5800	3000 až 3150
litina	7200	0,18 až 0,26	3500 až 5600	2200 až 3200
hliník	2700	0,34	6320	3130
měď	8900	0,35	4700	2260
stříbro	10500	0,38	3600	1590
platina	21400	0,39	3960	1670
zlato	19300	0,42	3240	1200

Ultrazvuk v kapalinách

V kapalinách je oproti pevným látkám situace o něco jiná. Kapalina nepřenáší smyková napětí, tudíž se v těchto látkách nešíří příčná ultrazvuková vlna c_T . V kapalinách se může šířit pouze podélná akustická vlna, jejíž rychlost je závislá na koeficientu adiabatické stlačitelnosti kapaliny, měrné hmotnosti, tlaku (zvýšení tlaku zvyšuje rychlost šíření) a na teplotě kapaliny.

Tabulka 2 Rychlost šíření ultrazvuku v kapalinách²

Kapalina	Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Rychlost podélných vln c_L [m.s ⁻¹]
voda (20 °C)	997	1483
motorový olej	870	1740
parafrínový olej	835	1444
transformátorový olej	200	1390
glycerín	1261	1920

Ultrazvuk v plynech

Pro srovnání s ostatními látkami uvedu pouze příklady plynů s hodnotami velikosti rychlosti šíření ultrazvukových vln. V plynech stejně jako v kapalinách se šíří pouze podélné ultrazvukové vlny c_L .

Tabulka 3 Rychlost šíření ultrazvuku v plynech⁴

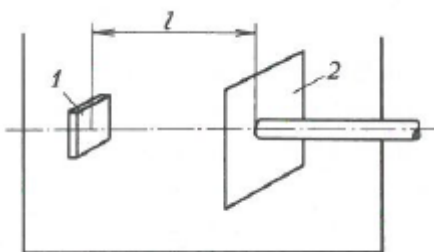
Plyn	Značka	Rychlost šíření ultrazvukových vln c_L [m.s ⁻¹]
hélium	He	965
kysličník uhličitý	CO ₂	259
vzduch	-	331
kyslík	O ₂	316
vodík	H ₂	1284

1.8 Měření rychlosti šíření ultrazvuku

Měření při spojitém vysílání

a) Interferometrická měření³

Při měření rychlosti ultrazvuku využívají interferometrická měření stojatých vln. Ve vzdálenosti l je od pevně uchyceného elektroakustického měniče umístěn pohyblivý plošný odražeč. Oba povrchy musí být ideálně planoparalelní. Pokud plynule měníme vzdálenost l odražeče od měniče, mění se i proud protékající z generátoru kmitů do měniče. Aby bylo měření co nejpresnější, je vhodné zajistit nastavitelnou polohu odražeče. Výsledná rychlost šíření se vypočte z rozdílu dvou naměřených vzdáleností odražeče. Interferometrickou metodou měření lze podle autora³ dosáhnout přesnosti naměřených hodnot 10^{-2} až 10^{-3} .



Obrázek 16 Interferometr pro kapaliny a plyny³: 1 – elektroakustický měnič, 2 – pohyblivý reflektor

b) Fázová měření³

Používá se pro měření rychlostí šíření v tenkých vzorcích a při malém rozsahu měřených změn rychlostí. Měří se doba průchodu t průchodovou nebo odrazovou metodou.

Impulsová měření

a) Měření impulsovými defektoskopy³

Měření běžně dostupnými impulsovými defektoskopy spočívá v nepřímém měření doby průchodu impulsu vyšetřovaným prostředím v časových nebo délkových jednotkách.

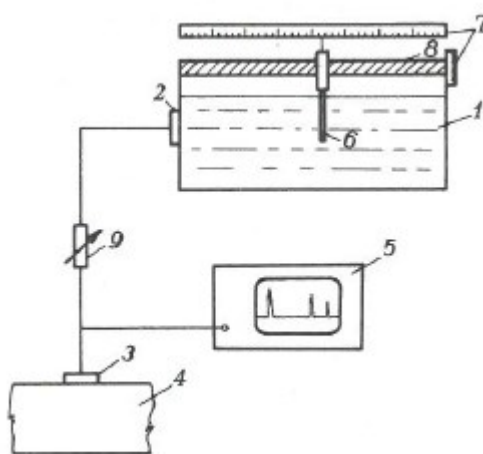
Používá se metoda průchodová nebo odrazová. Pro přesnější měření je vhodné eliminovat chybu počátku, a to zobrazením vícenásobných impulsů na obrazovce defektoskopu. Nastavení časové základny se provede na vzorcích s přesně známou rychlostí šíření ultrazvuku. K tomuto účelu lze využít např. ocelové měrky. Při odčítání z monitoru na přístroji nastaveném pro známou rychlost, vypočteme neznámou rychlost prostředí ze vztahu

$$c_x = c \cdot \frac{d}{d_m} [\text{m.s}^{-1}]$$

(1-6)

b) Měření interferometrem³

Interferometr je zařízení, obvykle naplněné destilovanou vodou s proměnnou kapalinovou dráhou, fungující na principu viz. Obrázek 16. V interferometru se šíří vždy podélná vlna. Neznámá rychlost šíření ultrazvuku se určí podle vztahu (1-6). Touto metodou lze měřit všechny druhy ultrazvukových vln.



Obrázek 17 Impulsové měření interferometrem³: 1 – nádoba s kapalinou, 2 a 3 – sondy, 4 – měřené prostředí, 5 – ultrazvukový defektoskop, 6 – reflektor (odražeč), 7 – stupnice, 8 – šroub, 9 – regulátor citlivosti

c) Číslicové měření rychlosti šíření

Je to metoda založená na principu zjišťování doby průchodu impulsu po známé ultrazvukové dráze. Měřenou veličinou je časový interval mezi prvním a koncovým impulsem, daný výrazem³

$$t = \frac{d}{c} \text{ [s] pro průchodovou metodu,}$$

(1-7)

nebo výrazem⁴

$$t = \frac{2 \cdot d}{c} \text{ [s] pro odrazovou metodu.}$$

(1-8)

2. Teorie tepelného zpracování oceli

2.1 Metastabilní rovnovážný diagram Fe-Fe₃C

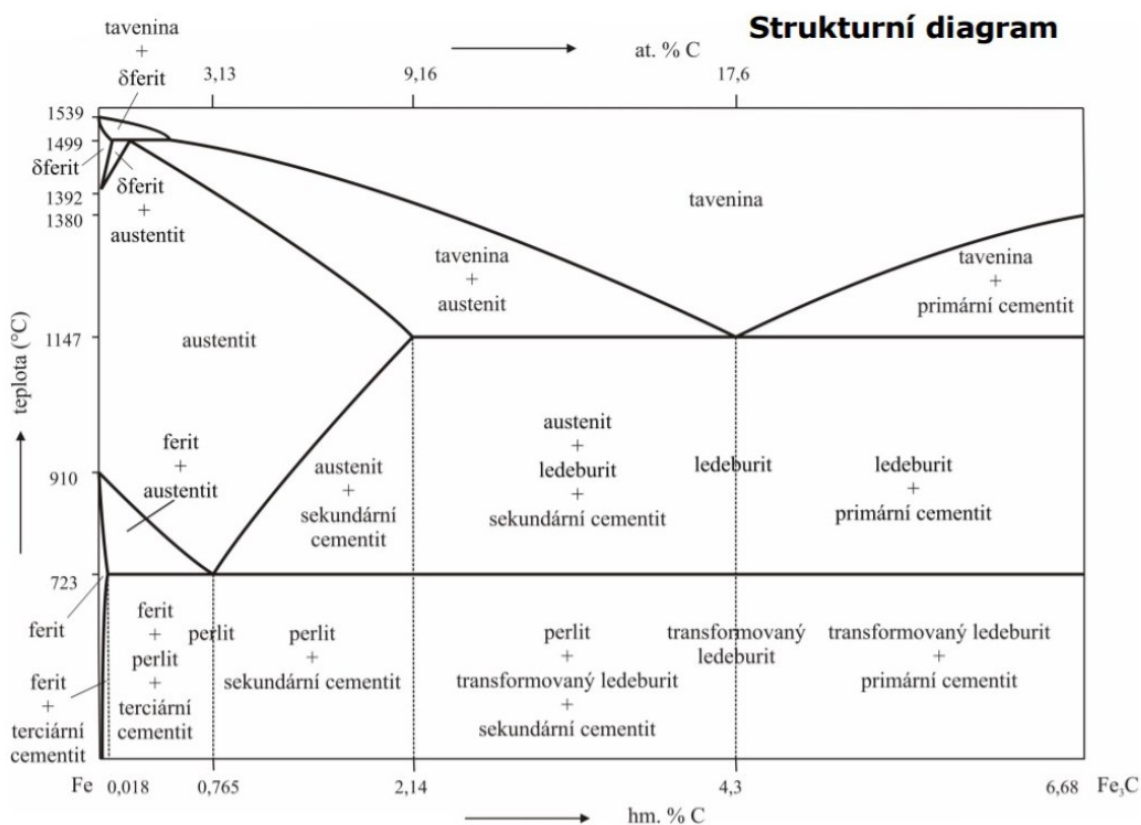
Metastabilní rovnovážný diagram Fe-Fe₃C popisuje fáze nebo strukturu při dané koncentraci C a teplotě T v ocelích a bílých litinách. Uhlík může být ve slitinách železa přítomen v:

- intersticiálním tuhém roztoku,
- intermediární fázi (karbid železa Fe₃C),
- formě grafitu.

Cementit Fe₃C je nestabilní fází a v diagramu je jeho koncentrace 6,68 % C (hmotnostní). Krystalizuje v kosočtverečné soustavě. Je tvrdý a křehký, a protože není termodynamicky stabilní, za vysokých teplot se rozkládá na železo a grafit. Tuhý intersticiální roztok uhlíku s železem může existovat v obou variantách krystalizace železa – Fe_α i Fe_γ. Rozpustnost uhlíku v železe γ je větší než v železe α .

Diagram obsahuje primárně tři tuhé roztoky železa s uhlíkem:

- pod teplotou 1538 °C je oblast δ -feritu, s maximální rozpustností 0,1 hm. % C při teplotě 1499 °C. Krystalová mřížka je zde tvořena kubickou prostorově středěnou buňkou,
- fáze tvořená kubickou plošně středěnou buňkou – Fe_γ – neboli *austenit*, je tvořen tuhým roztokem C a již zmíněnou modifikací železa γ . Maximální rozpustnost uhlíku v železe γ je 2,14 hm. % C za teploty 1147 °C a 0,765 hm. % C při teplotě 727 °C,
- za nízkých teplot existuje v ocelích další fáze – *ferit*, neboli železo α s prostorově centrovanou kubickou mřížkou. Tento tuhý roztok dokáže rozpustit maximálně 0,02 hm. % C při teplotě 727 °C. ⁴



Obrázek 18 Diagram Fe-Fe₃C ⁵

V rovnovážné soustavě existují tři reakce, které probíhají při konstantní teplotě⁴:

- eutektická,
- eutektoidní,
- peritektická.

Při eutektické reakci se tavenina o složení 4,3 % C a teplotě 1147 °C mění na eutektikum - *ledeburit*. Ledeburit obsahuje množství austenitu a cementitu.

Reakce *eutektoidní* probíhá při teplotě 727 °C a chemickém složení 0,765 hm. % C. Přeměňuje austenit na eutektoidní směs feritu a cementitu. Vzniklá perlitická struktura je lamelární.

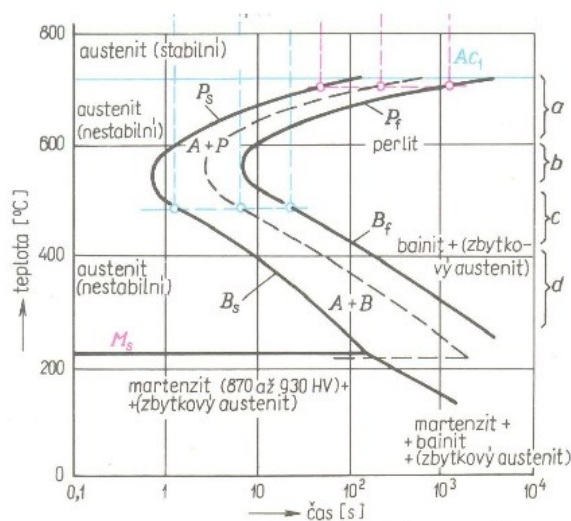
Reakce *peritektická* probíhá při teplotě 1499 °C s 0,51 hm. % C a již vyloučeným tuhým roztokem δ-feritu za vzniku peritektického austenitu o obsahu uhlíku 0,16 % C.

2.2 Rozpad tuhého roztoku

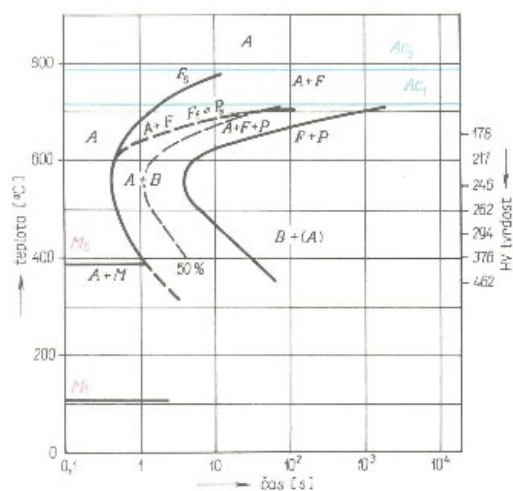
V kapitole 2.1 byl popsán rovnovážný stav a struktury vznikající při pozvolném ochlazování taveniny a tuhých roztoků. V praxi často potřebujeme využít úmyslně nestabilních stavů slitin, protože ty mají většinou lepší a příznivější mechanické vlastnosti. U ocelí lze dosáhnout nerovnovážných stavů z austenitické oblasti rozpadem tuhého roztoku austenitu. Rozpad austenitu může probíhat při konstantní nebo klesající teplotě.

Rozpad austenitu při konstantní teplotě

Vzorek se ohřeje na teplotu, při které bude strukturu materiálu tvořit austenit. Po krátké výdrži na teplotě se vzorek prakticky okamžitě – *izotermicky* ochladí. Pokud je překročena kritická rychlost ochlazování, plně se omezí difuzní a segregáční procesy. Austenit se rozpadá na nově vzniklé struktury. Další ochlazení na teplotu okolí již se strukturou nic neudělá. Prudkého ochlazení celého průřezu materiálu lze dosáhnout pouze u tenkých předmětů, a proto hovoříme o izotermickém rozpadu austenitu, označovaném jako *IRA diagram*. V diagramu tvoří vodorovnou osu čas v logaritmickém měřítku a svislou osu teplota viz. Obrázek 19 a Obrázek 20.



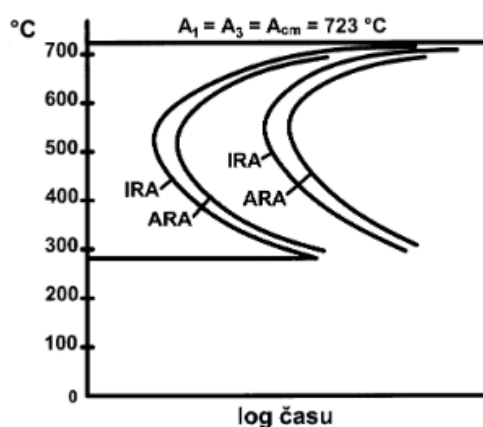
Obrázek 19 IRA diagram eutektoidní oceli⁶



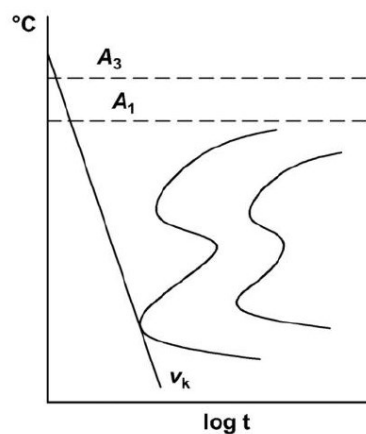
Obrázek 20 IRA diagram podutektoidní oceli⁶

Rozpad austenitu při klesající teplotě

Výchozím bodem je opět materiál ohřátý do oblasti austenitu. Ochlazování výrobků větších tloušťek již nebude izotermické, a to právě z důvodu větších tloušťek. Ochlazování totiž probíhá čím pomaleji, čím je vzdálenost od povrchu větší. Hodnoty teplot a časů byly získávány při různých teplotách začátků a konců přeměn – *anizotermicky* a vytvořily tzv. *diagram anizotermického rozpadu austenitu – ARA diagram*.



Obrázek 21 ARA diagram rozpadu austenitu v porovnání s IRA diagramem (eutektoidní ocel)⁷

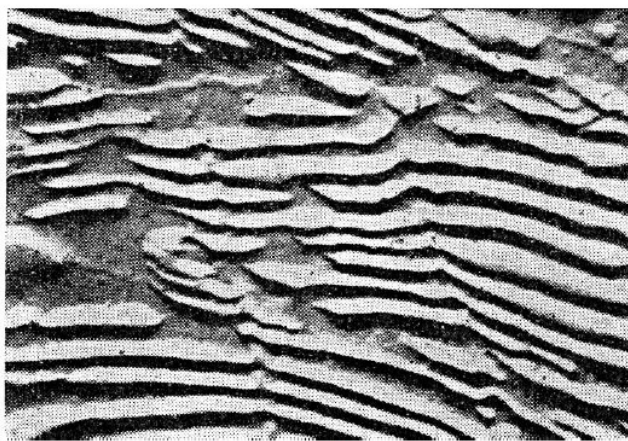


Obrázek 22 ARA diagram - kritická ochlazovací rychlost (podeutektoidní ocel)⁷

2.3 Rozpad austenitu – vzniklé struktury

Perlit

Perlit vzniká při perlitické přeměně pod eutektoidní teplotou 723 °C. Proces vzniku je řízen difuzními pochody. Perlit tvoří směs jemného feritu a cementitu. Na počátku perlitické přeměny je nukleace cementitu nebo feritu na hranici původního austenitického zrna. Lamely feritu mají v porovnání s cementitem větší tloušťku. Teplota vzniku perlitu má podstatný vliv na vzdálenost mezi lamelami a na celkovou tloušťku lamel.⁴



Obrázek 23 Lamelární perlit⁷, uhlíková ocel 1%hm. C, zvětšeno 6000×

Bainit

Bainit je nerovnovážná nestejnorodá struktura oceli, která vzniká podchlazením austenitu pod teplotu 500 °C. Mechanismem vzniku bainitické struktury je difuze uhlíku a zároveň je téměř potlačena difuze železa. Strukturu bainitu tvoří směs přesyceného feritu a nelamelárního karbidu. S klesající teplotou přeměny roste tvrdost a pevnost bainitické struktury. Horní bainit vzniká v rozmezí teplot 350 °C až 500 °C na hranicích původních austenitických zrn. Desky bainitického feritu rostou spíše do délky a minimálně do šířky.

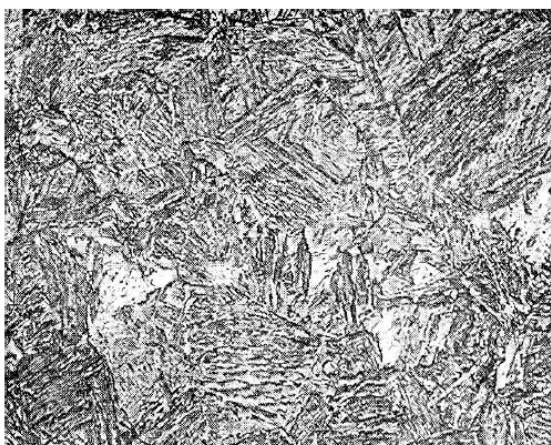
Vznik dolního bainitu je podmíněn dolní teplotou bainitické přeměny a tvoří jej bainitický ferit přesycený uhlíkem a uvnitř precipitované karbidy. Mikrostruktura dolního bainitu je tvořena jemnou strukturou jehlic s karbidy. Bainit je považován za strukturu vznikající při kalení, vyznačující se vysokou pevností a zároveň dostatečnou houževnatostí.⁴



Obrázek 24 Bainit⁷, uhlíková ocel s 1 hm. % C, zvětšeno 500×

Martenzit

Martenzit popisujeme jako nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Vzniká za intenzivního ochlazování oceli, kdy jsou potlačeny substituční a intersticiální procesy difuze a přeměna austenitu proběhne bezdifuzně. Tím se zamezí přesunu uhlíku prostorem krystalické mřížky. Atomy uhlíku zůstávají na svých místech. Vznikne přesycený tuhý roztok se silným vnitřním pnutím, které se projeví vysokou tvrdostí a pevností. Materiál je velmi křehký a bez další tepelné úpravy téměř nepoužitelný.^{4,8}



Obrázek 25 Mikrostruktura martenzitu⁷, zvětšeno 300×

2.4 Rozdělení tepelného zpracování

Normalizační žíhání

Normalizační žíhání je tepelný postup pro zjemnění hrubého zrna ve struktuře materiálu. Hrubé zrno se může vytvořit při lití nebo tváření za vysokých teplot. U výkovků často nelze dosáhnout stejné dokovací teploty nebo stejného stupně překování i v rámci jednoho kusu, zvláště pokud je tvořen různými průřezy. Normalizačním žíháním dokážeme zrno zjemnit a sjednotit jeho velikost. U podeutektoidních ocelí provedeme ohřev materiálu na teplotu o 30 °C až 50 °C vyšší než je bod přeměny A_{c3} . Po výdrži na teplotě provedeme ochlazení na volném vzduchu. Normalizační žíhání se používá i jako příprava materiálu pro další tepelné zpracování kalením. Normalizace však může být i jako konečná tepelná úprava materiálu, např. méně namáhané strojní díly z uhlíkových ocelí⁸. Důležitou roli hraje normalizační žíhání u odlitků. Ty mají po odlití hrubé a nestejnoměrné zrno, které vzniká při pomalém ochlazování z odlévací teploty. Normalizací se výsledné zrno zjemní a vylepší se jeho plastické vlastnosti. Pokud normalizaci opakujeme, zrno se dále zjemňuje. Důvodem je překrystalizace. Zjemnění zrna je tím větší, čím rychleji provedeme ohřev na žíhací teplotu a čím rychlejší je ochlazení.⁸

Žíhání na odstranění pnutí

Žíháním na odstranění pnutí odstraníme vnitřní pnutí materiálu, které mohlo v oceli vzniknout nerovnoměrným chladnutím po tvářecích operacích nebo po svařování, po rovnání a po třískovém obrábění v povrchových vrstvách materiálu. Žíhání začíná ohřevem na teplotu nižší, než je teplota A_{c1} , výdrží na této teplotě a následným pomalým ochlazením na okolní teplotu. V případě žíhání po rovnání zušlechťených výrobků se musí žíhací teplota nastavit na hodnotu nižší, než byla teplota popouštění. Žíhání na odstranění pnutí nemá podstatný vliv na původní vlastnosti materiálu, protože u něj nedochází ke strukturním změnám.⁸

Kalení

Kalení je tepelná úprava materiálu, která má zajistit vyšší tvrdost oceli. Spočívá v ohřevu materiálu na teplotu 20 °C nad A_{c3} , resp. 20 °C nad A_{c1} . Následuje výdrž na této teplotě a prudké ochlazení, které v podstatě zamezí rovnovážným změnám. Prudkým ochlazením z kalicí teploty se austenit přemění na martenzit nebo bainit. Ochlazovací rychlost musí být pro dosažení martenzitu stejná nebo vyšší, než je kritická ochlazovací rychlost. Ta je tím nižší, čím vyšší je obsah uhlíku a slitinových prvků. Snížením kalicí

teploty podeutektoidních ocelí se v martenzitu objeví ferit a výsledná tvrdost se sníží. Příliš dlouhá doba výdrže a překročení správné kalicí teploty vede k růstu austenitického zrna a po ochlazení se struktura projeví hrubými martenzitickými jehlicemi, což způsobí nárůst křehkosti materiálu.⁸

Popouštění

Popouštění je tepelný proces, který následuje po operaci kalení. Spočívá v ohřevu kaleného předmětu na teplotu maximálně těsně pod bod A_{c1} , výdrží na této teplotě a ochlazením vhodnou rychlostí. Popsaný postup kalení a popouštění se označuje jako *zušlechťování*. Hlavním důvodem popouštění konstrukčních ocelí je snížení tvrdosti, pevnosti a naopak zvýšení plastických vlastností. Změny mechanických vlastností, způsobené strukturními změnami ovlivňuje především hodnota popouštěcí teploty. Méně výrazný vliv má doba popouštění.⁸

3. Stávající situace ve výrobě etalonů, řešení neshodných kusů

Polotovary pro výrobu kalibrační měrky č. 1 (dále K1) se vyrábějí ve firmě Strojírny a stavby Třinec, a.s. (dále SaS). SaS jsou 100 % dceřinou akciovou společností Třineckých železáren a. s. (dále TŽ). Firma má dlouholetou tradici v oblasti strojírenské výroby pro tuzemské a zahraniční zákazníky. Především zakázková výroba technologických celků, svařenců, ocelových konstrukcí volně kovaných výkovků a výroba hutních válců pro válcování za tepla. Mimo strojírenskou výrobu má firma provozy zajišťující výrobu ve stavebnictví, průmyslových a občanských stavbách, opravárenských a údržbářských pracích.

Výrobní provozy SaS⁹:

- Mechanické dílny
- Soustružna válců
- Zámečnické dílny
- Elektrotechnické dílny
- Stavební dílny
- Žárotechnické dílny
- Konstrukce (konstruktérské práce, vývoj výrobků apod.)

Výroba polotovarů K1 je zajišťována provozem Mechanické dílny ve vlastní kovárně. Kovárna nabízí volně kované výkovky až do hmotnosti 3t a její součástí je i dílna tepelného zpracování výkovků, kde se ve vozových nebo šachtových pecích výkovky tepelně zpracovávají v řízeném procesu tepelných předpisů.

Nabízené kovárenské výrobky⁹:

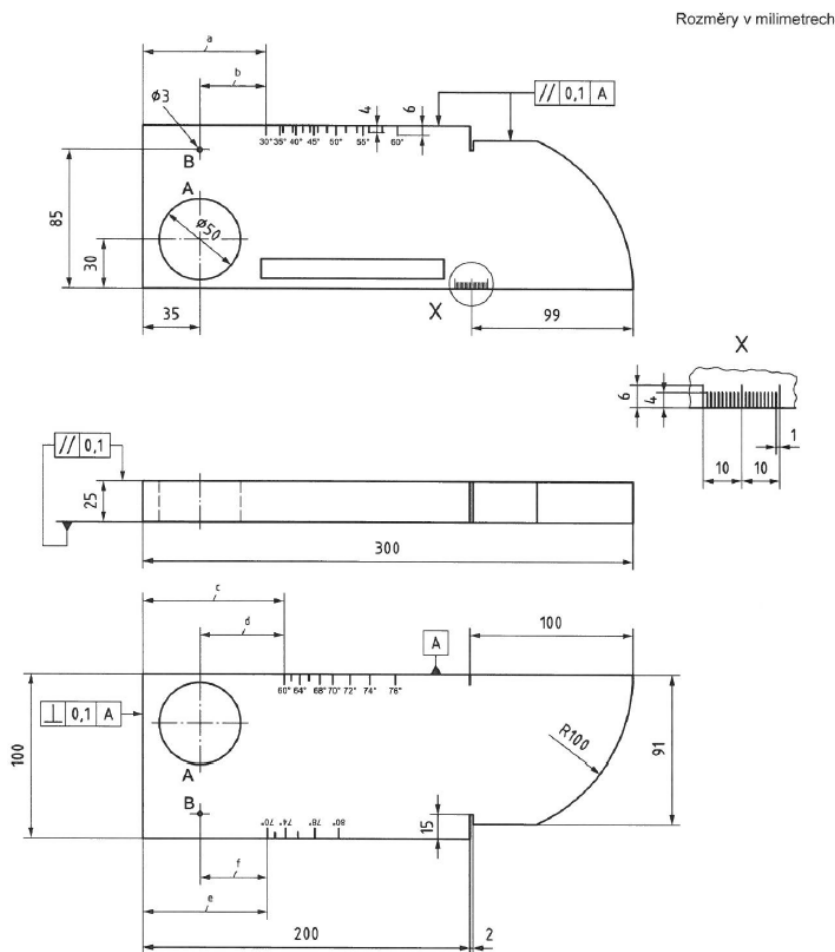
- kované tyče čtvercového, kruhového průřezu a průřezů osazených,
- kované hřídele,
- kované nápravy,
- kování kroužků a pastorků,
- polotovary pro výrobu zápustek a nářadí.

3.1 Požadavky zákazníka

Zákazník z námi dodaných polotovarů vyrábí finální výrobek – *kalibrační měrku číslo 1* (Obrázek 26) – dle požadavků normy ČSN EN ISO 2400¹⁰. Tato norma obsahuje informace o požadavcích na rozměry, materiál a výrobu kovové měrky pro kalibraci ultrazvukového zkušebního zařízení při ručním zkoušení.

Znění objednávky

- výroba z materiálu S355J0,
- tepelné zpracování dle požadavků normy 2400¹⁰,
- opracování všech povrchů na Rz 16,
- měření rychlostí šíření ultrazvuku příčných vln $c_T = 3255 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \pm 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 26 Kalibrační měrka č. 1 – finální podoba¹⁰

Materiál

Materiál je dodáván z TŽ ve formě válcovaných bloků 280 mm × 280 mm × 2720 mm. Dodávaný stav oceli S355J0 + AR, tedy v přírodním stavu a odpovídá materiálové normě ČSN EN 10 025-2¹¹.

Tabulka 4 Chemické složení S355J0¹¹

Označení		Způsob desoxidace	C v % max. pro výrobek jmenovité tloušťky > 40 mm	Si % max	Mn % max	P % max	S % max	N % max	Cu % max
Podle EN 10027-1	Podle EN 10027-2								
S355J0	1.0553	Není dovolená neuklidněná ocel	0,22	0,55	1,60	0,030	0,030	0,012	0,55

Chemické složení oceli značky S355J0 je omezeno pouze horní hranicí obsahu prvků. To poskytuje dostatečný prostor pro různorodost chemického složení dané značky. Kombinace různých prvků a jejich procentní zastoupení v oceli mohou podstatně ovlivnit mechanické vlastnosti materiálu.

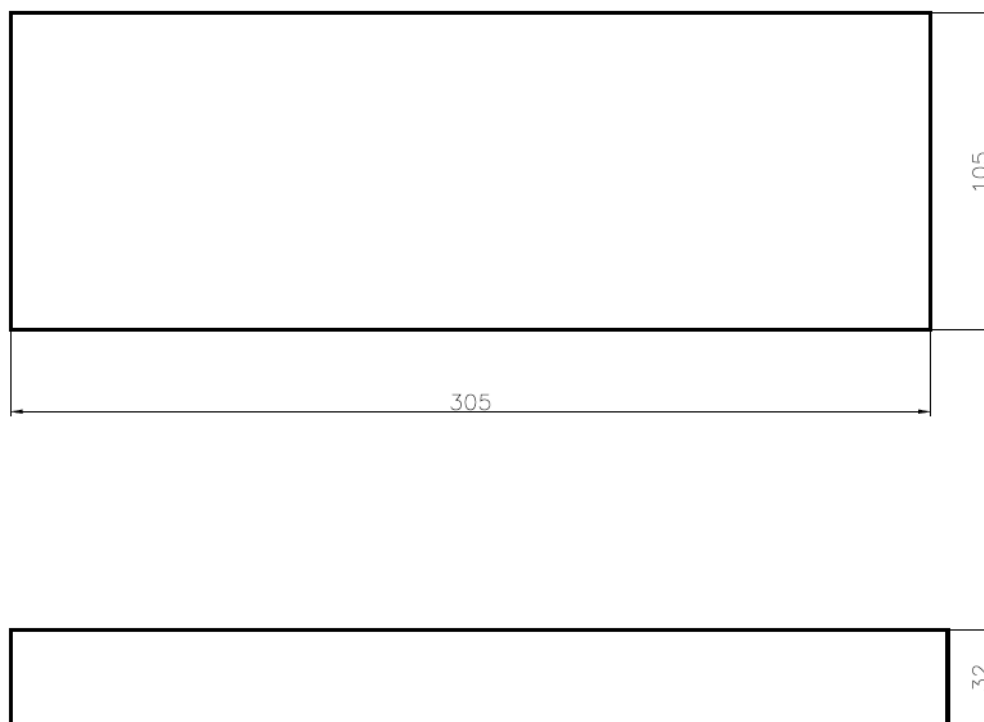
Tepelné zpracování

Tepelné zpracování předepisuje norma ČSN EN ISO 2400^{10 str. 6} takto:

- austenitizační žihání při teplotě 920 °C po dobu 30 minut,
- prudké ochlazení (kalení ve vodě),
- žihání při teplotě 650 °C po dobu 3 hodin,
- chladnutí na klidném vzduchu.

3.2 Výroba

Schéma polotovaru kalibrační měrky č. 1



Obrázek 27 Rozměry polotovaru [mm]

Rámcový technologický postup výroby

Vstupním polotovarem kovárny je válcovaný blok jakosti S355J0 (Tabulka 4) o rozměrech příčného průřezu 280 mm × 280 mm. Z dodané délky 2720 mm je blok upraven řezáním na délku 700 mm až 750 mm. Takto připravený blok je vložen do plynové pece, kde se ohřeje na kovací teplotu 1200 °C. Postupným prodlužováním na kovacím lisu CKV 630 a odseknutím požadované délky jsou vykovány pásy o rozměru 117 mm × 40 mm × 730 mm. Výkovky chladnou na volném vzduchu. Takto je na zakázku zhotoveno 100 kusů výkovků. Materiál je označen číslem výrobního příkazu, jakostí materiálu a číslem tavby (Obrázek 30).

Výkovky jsou dále normalizačně žíhány (Obrázek 31) v dílně tepelného zpracování (dále DTZ) SaS. Normalizace se provádí v kalicí elektrické vozové peci se záznamem průběhu konkrétního tepelného předpisu (Tabulka 5).



Obrázek 28 Kalící pece
(1000 mm × 700 mm × 1500 mm)



Obrázek 29 Výrobní štítek peci



Obrázek 30 Identifikace výkovků (raženo v kovárně)



Obrázek 31 Normalizačně žíhané výkovky
117 mm × 40 mm × 730 mm

Po normalizaci jsou výkovky převezeny do řezárny, kde jsou na pásové pile odřezány oba konce a výkovek je rozřezán na dvě poloviny. Takto je připravena výrobní dávka 200 ks přířezů, které jsou následně transportovány k opracování na univerzální konzolové frézce.



Obrázek 32 Řezání výkovků



Obrázek 33 Hotové přířezy (117 mm × 40 mm × 310 mm) k odeslání na frézku

Frézováním se opracovávají všechny dlouhé plochy budoucí kalibrační měrky. Plocha dvou čel zůstává s povrchem po řezání. Při této operaci se ponechá přídavek pro další opracování po tepelném zpracování o velikosti 2 mm na plochu.

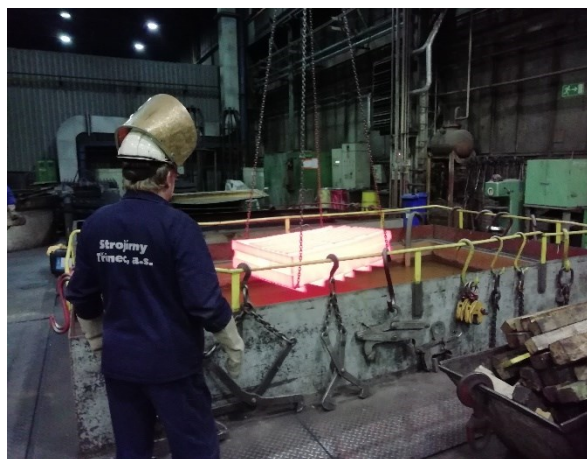


**Obrázek 34 Frézování na univerzální frézce
FA5U**

Na hrubovaných polotovarech kalibrační měrky následuje konečné tepelné zpracování. Z obráběcí dílny jsou všechny kusy převezeny zpět do DTZ a uloženy na kovovou paletu. Z důvodu možného vneseného povrchového pnutí po třískovém obrábění jsou výkovky podrobeny žíhání na odstranění pnutí. Další operací v pořadí je kalení. Ohřev na kalicí teplotu 920 °C se provádí v kalicích pecích (Obrázek 28), doba výdrže na teplotě je 30 minut. Prudké zchlazení je provedeno v nádrži s cirkulující vodou. Poslední operací TZ je popouštění při teplotě 650 °C po dobu 4 hodin.



Obrázek 35 Uložení polotovaru na kovovou paletu



Obrázek 36 Kalení do vody

Tepelný předpis

Tabulka 5 Předpis tepelného zpracování

Druh tepelného zpracování	Teplota [°C]	Doba výdrže [h]	Ochlazovací medium
Normalizační žíhání	870 až 900	2 až 3	vzduch
Žíhání na odstranění pnutí	550 až 620	2 až 3	pec
Kalení	920	0,5	voda
Popouštění	650	4	vzduch

Po dokončení TZ polotovaru jsou výkovky opět převezeny do obráběcí dílny, kde jsou obrobena na hotový rozměr (Obrázek 27). Opracovány jsou všechny povrchy, tzn. čtyři dlouhé plochy a dvě čelní plochy. Výsledná kvalita povrchu musí odpovídat Rz 16.

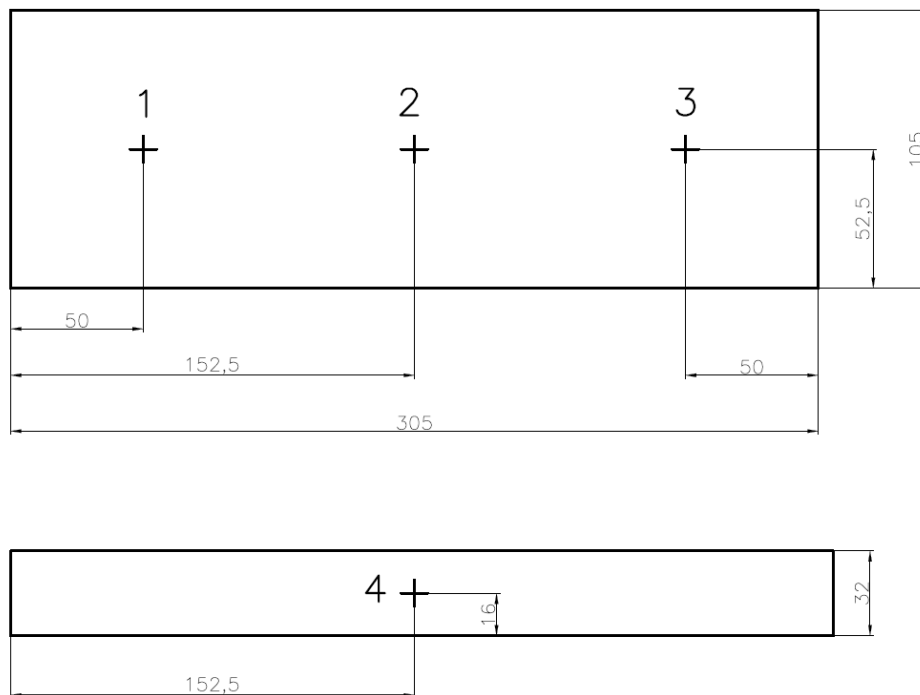
3.3 Kontrola

Rozměrová kontrola

Rozměrová kontrola má u tohoto výrobku v zásadě dva významy. Jednak kontrola rozměrů dle normy pro úchytky netolerovaných rozměrů¹² a zadruhé v konkrétních

hodnotách rozměrů v kontrolních bodech pro srovnávací měření rychlosti ultrazvuku, kdy naměřená hodnota bude porovnávána s dráhou ultrazvuku na displeji defektoskopu.

Rozměrovou kontrolu provádím ve čtyřech kontrolních bodech. Ve třech bodech tloušťky 32 mm (bod 1, 2, 3) a v jednom bodě na výšku výkovku 105 mm (bod 4) (Obrázek 37). Vynesení jsem provedl pomocí papírové šablony a permanentního popisovače.



Obrázek 37 Definování kontrolních bodů, rozměry v [mm]

Protože se jedná o polotovary, jsou zákazníkem definovány pouze mezní úchytky netolerovaných rozměrů podle ČSN ISO 2768-1 třída přesnosti *m*. Ve Strojnických tabulkách^{12 str.138} jsou pro jmenovité rozměry definovány mezní úchytky pro rozpětí netolerovaných rozměrů přes 30 mm do 120 mm $\pm 0,3$ mm, a pro rozpětí přes 120 mm do 400 mm $\pm 0,5$ mm. Toleranční pole rozměru:

- v kontrolních bodech 1, 2, 3: 32 mm $\pm 0,3$ mm
- v kontrolním bodě 4: 105 mm $\pm 0,5$ mm
- délky polotovaru: 305 mm $\pm 0,5$ mm

Přesné definování polohy kontrolních bodů je důležité proto, protože v těchto bodech je požadováno měření rychlosti šíření ultrazvukových vln. Z kontroly v těchto bodech provedu záznam naměřených hodnot a délku polotovaru proměřím namátkově bez dalšího záznamu.

Měřidla

Pro kontrolu v bodech 1 až 3 použiju třmenový mikrometr s hlubokým třmenem o rozsahu 25 mm až 50 mm s přesností měření na 0,01 mm (Obrázek 38).

Kontrolní bod č. 4 proměřím třmenovým mikrometrem o rozsahu 100 mm až 125 mm s přesností měření na 0,01 mm (Obrázek 38).

Délku polotovaru proměřím posuvným mechanickým měřítkem o rozsahu do 500 mm s přesností měření na 0,05 mm.

Záznam z měření provádím do „Záznamového listu“, viz. Příloha A.



Obrázek 38 Třmenový mikrometr: nahoře 25 mm až 50 mm, dole 100 mm až 125 mm


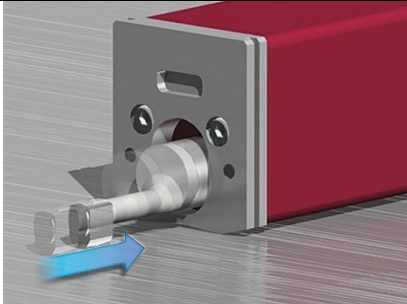
Měření drsnosti opracovaných ploch

Pro jakékoliv aplikování ultrazvuku (zjišťování nehomogenit materiálu, měření tloušťky apod.) je důležitý stav zkušebního povrchu. Proto má kontrola opracovaných ploch a dodržení struktury povrchu *Rz 16* značný vliv při měření rychlosti ultrazvuku s kontaktní vazbou (Obrázek 14).

Měření struktury povrchu jsem provedl přenosným drsnoměrem *Surftest SJ-210*. Přístroj je vybaven výsuvným snímacím hrotem, který nasnímá potřebné údaje ze struktury povrchu a výsledek zobrazí na displeji. Parametry přístroje jsou uvedeny v Tabulce 6.

Tabulka 6 Vybrané vlastnosti Mitutoyo Surftest SJ-210¹³

Mitutoyo Surftest SJ-210

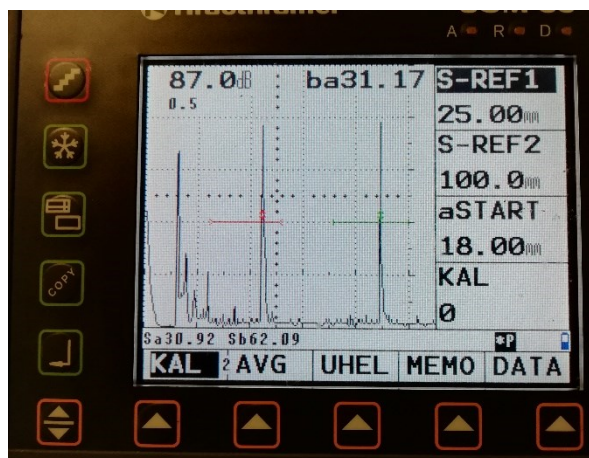
	
Měřicí síla snímače	0,75 mN
Úhel snímacího hrotu	60°
Poloměr snímacího hrotu	2 μm
Hmotnost	500 g
Rozsah měření	16 mm 4,8 mm (S-model)
Příčný směr	17,5 mm 5,6 mm (S-model)
Rozsah měření	360 μm
Snímací dotek	Diamantový hrot
Poloměr patky měření	40 mm
Měřicí přítlačná síla	0,75 mN

Měření rychlosti ultrazvukových vln

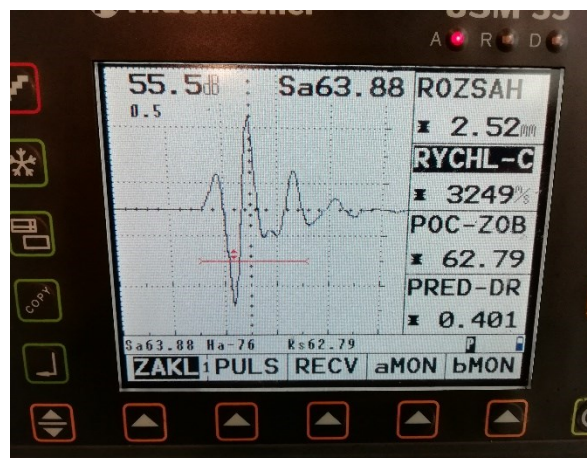
Předmětem měření jsou pouze rychlosti příčných vln c_T . Důvodem jsou dlouholetá měření u zákazníka, kdy podkročení rychlostí je zaznamenáváno pouze u tohoto typu ultrazvukových vln.

Měření rychlostí šíření ultrazvuku jsem provedl pomocí univerzálního defektoskopu od firmy Krautkrämer, typ USM 35X S¹⁴. Digitální defektoskop po nastavení časové základny na kalibrační měrce č. 1¹⁰ umožňuje číst aktuální rychlost šíření ultrazvuku při nastavení takové rychlosti, až se bude zobrazená dráha ultrazvuku Sa na displeji shodovat s naměřenou hodnotou třmenovým mikrometrem (viz. kapitola 3.3) v jednotlivých kontrolních bodech.

Pro mou diplomovou práci jsem použil vysokofrekvenční (HF-mód) zobrazení koncového echa, narozdíl od bakalářské práce¹⁵, kde jsem používal zobrazení v usměrněném režimu. Odečet dráhy ultrazvuku z brány je nastaven na vrchol půlvlny. Pro reprodukovatelnost měření jsem oba soubory uložil do vnitřní paměti defektoskopu.



Obrázek 39 Usměrněné zobrazení



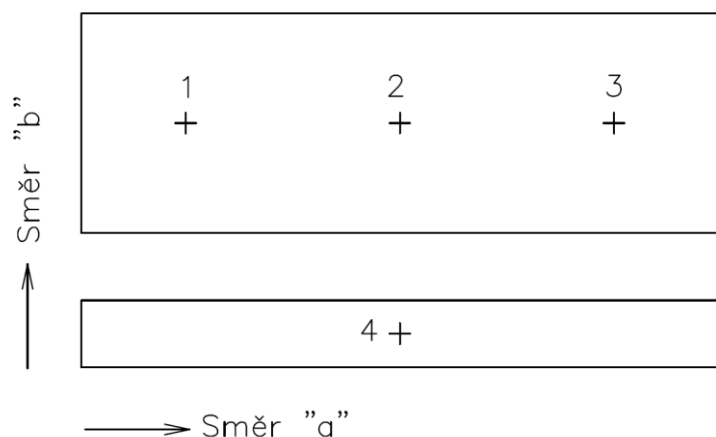
Obrázek 40 Vysokofrekvenční (HF) zobrazení

K nastavení časové základny a měření rychlosti ultrazvuku jsem použil přímou sondu příčných vln V155 (frekvence 5 MHz, výrobce Olympus). Aby sonda mohla šířit příčné ultrazvukové vlny do materiálu, je nutné použít speciální vazební pastu, nebo jako v mém případě, štěpařský vosk. Ten jsem použil jak pro kalibraci časové základny, tak pro samotná měření. Gely na bázi vody nepřenášejí příčné vlny.

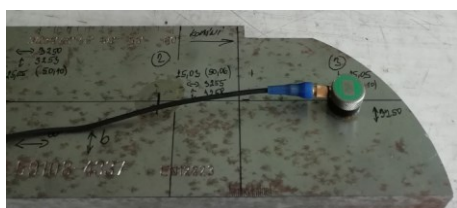
Metodika měření

Z rozměrové kontroly již mám zaznamenány hodnoty rozměrů v kontrolních bodech. Dvojnásobek naměřených rozměrů použiju jako druhé koncové echo a v defektoskopu tím eliminuji chybu počátku při odečtu z prvního koncového echa. U příčných vln je důležité rozlišovat směry zkoušení z důvodu jejich polarizace. Proto u měření musím rozlišit dvě polohy sondy:

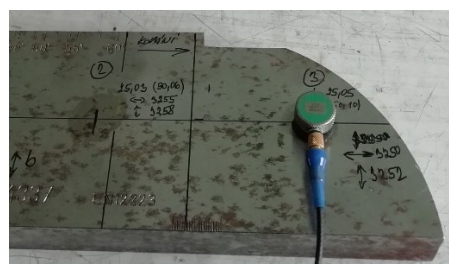
- polohu sondy „a“: poloha kopíruje nejdelší stranu polotovaru a pozice sondy je taková, že osa konektoru sondy je paralelně s tímto směrem,
- polohu sondy „b“: poloha kopíruje kratší stranu polotovaru a je kolmá na pozici sondy *a*. Osa konektoru sondy je paralelně s kratší stranou polotovaru.



Obrázek 41 Směry zkoušení



Obrázek 42 Poloha sondy *a*



Obrázek 43 Poloha sondy *b*

3.4 Uvolnění výkovku

Ze schématu (viz. Obrázek 41) plyne, že na každý kontrolní bod musím aplikovat dva směry (dvě polohy) zkoušení. Celkový počet naměřených hodnot rychlostí bude 8 (1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b). Hodnoty rychlostí musí být ve všech bodech a směrech zkoušení vyhovující. Za vyhovující se považuje polotovar, který splňuje podmínku $c_T = 3255 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \pm 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Kterýkoliv nevyhovující bod je důvodem k vyřazení polotovaru.

3.5 Neshodné kusy a jejich řešení

Polotovary nesplňující požadavky uvedené v kapitole 3.4 byly doposud označeny žlutou nálepkou jako „NESHODA“ a sešrotovány. Po kontrole všech kusů ze zakázky jsem informoval obchodní oddělení o počtu vyhovujících polotovarů. Neshodné kusy se nenahrazovaly novou výrobou, ale obchod SaS snížil objednávku o počet nevyhovujících kusů. Uvolněné kusy byly následně uloženy a zabaleny na paletě, označeny štítkem s informací o číslu zakázky a počtu kusů. Zakázku jsem ve výrobním systému SyteLine označil za hotovou a uzavřel.

4. Návrh tepelného zpracování a destruktivních zkoušek

Při kontrole dvou realizovaných zakázek (400 ks výkovků) jsem vyřadil 211 neshodných kusů. O toto množství nebylo možné snížit počet objednaných kusů. Nejjednodušší cestou by bylo všechny neshody nahradit novými kusy. Druhým přístupem by mohla být myšlenka na „záchranu“ těchto kusů a následně i postup při opravě neshodných kusů v budoucnu. Navrhl jsem celý proces tepelného zpracování opakovat. Než ale riskovat tepelné zpracování 211 ks s nejasným výsledkem, vybral jsem z těchto kusů čtyři vzorky a na nich realizoval praktickou část této práce. Obě zakázky byly vykovány z jakosti S355J0 a tavby č. 39961 viz. Příloha B. Zajímala mě závislost tepelného zpracování a rychlosti šíření ultrazvuku při jednotlivých fázích TZ. Vybrané výkovky jsem označil čísly 1 až 4 a tepelné zpracování navrhl tak, že každý vzorek bude mít jiný stav TZ viz. Tabulka 7.

4.1 Návrh tepelného zpracování vzorků

Tabulka 7 Rozdělení vzorků podle tepelného zpracování

Vzorek	Druh tepelného zpracování
Č. 1	Původní tepelné zpracování (PTZ)
Č. 2	PTZ + normalizační žíhání (NŽ)
Č. 3	PTZ + NŽ + kalení (K)
Č. 4	PTZ + NŽ + K + popouštění (P)

4.2 Dílenské měření tvrdosti

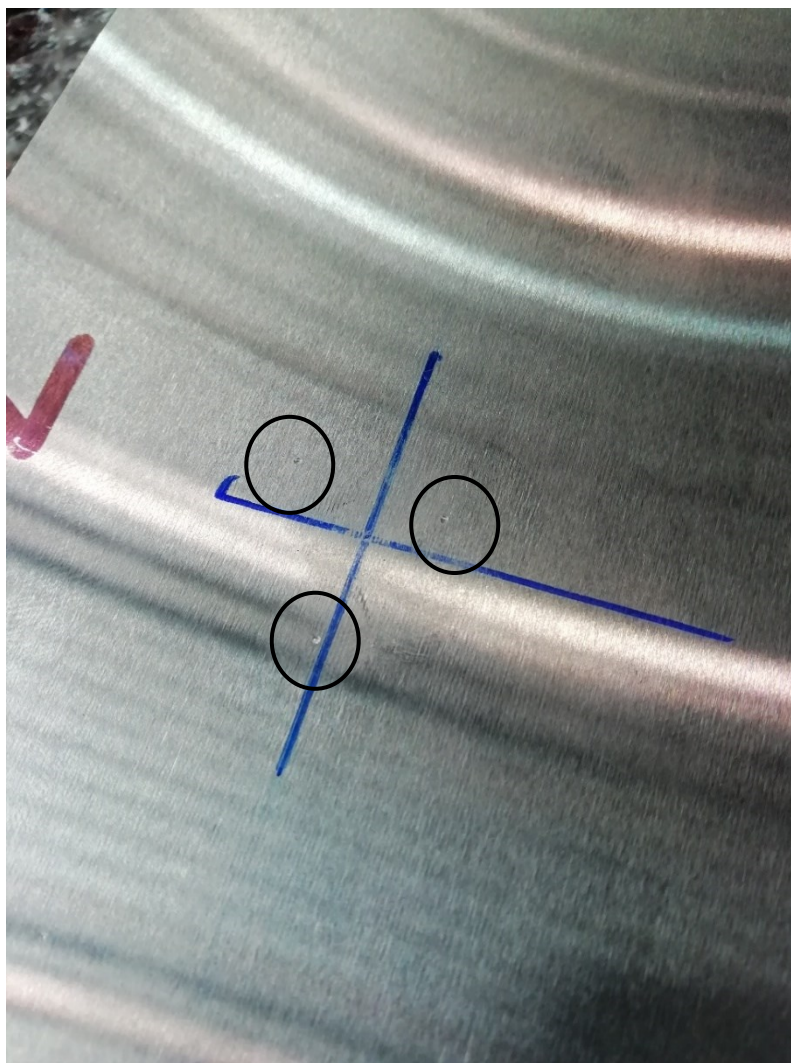
Abych částečně popsal pevnostní charakteristiku materiálu, navrhl jsem dílenské měření tvrdosti podle Brinella v kontrolních bodech (nebo v jejich bezprostředním okolí) polotovaru viz. Obrázek 37. V každém kontrolním místě budou provedena tři měření a reprezentantem tvrdosti bude jejich průměrná hodnota. Dílenské měření tvrdosti jsem provedl přístrojem *Proceq Equotip 3* a sondou *D*.



Obrázek 44 Proceq Equotip 3



Obrázek 45 Sonda "D"



Obrázek 46 Detail vpichů v okolí kontrolního bodu

Výsledky měření uvádím v tabulce dole:

Tabulka 8 Hodnoty rychlostí c_T a tvrdosti HB; červeně jsou označeny nevyhovující hodnoty rychlostí

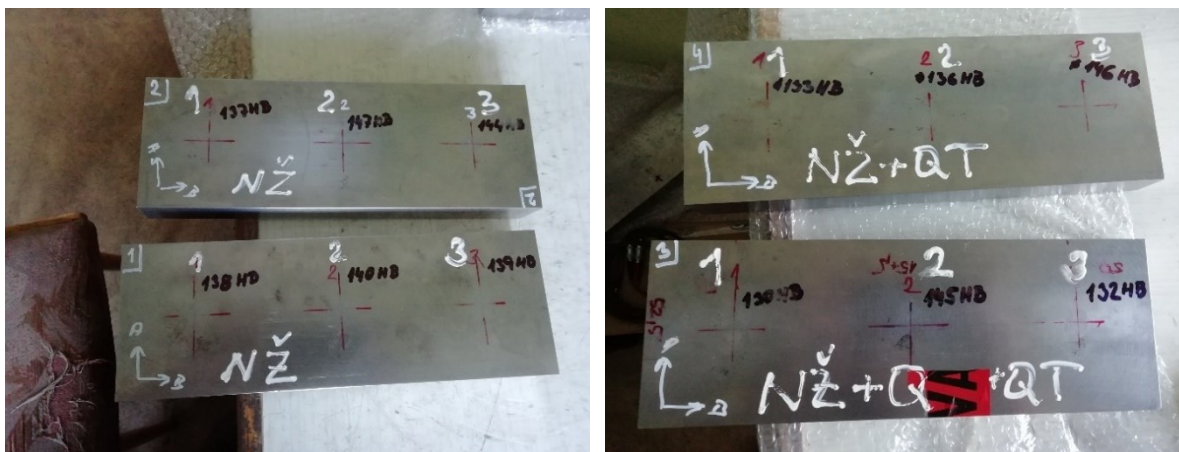
Vzorek		Kontrolní body polotovaru							
		1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
Č. 1	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3255	3255	3245	3227	3248	3252	3243	3239
	Tvrlost HB	138		140		139		144	
Č. 2	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3251	3249	3240	3245	3234	3239	3229	3245
	Tvrlost HB	137		147		144		146	
Č. 3	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3241	3237	3247	3249	3228	3241	3245	3227
	Tvrlost HB	130		145		132		158	
Č. 4	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3239	3255	3233	3241	3235	3245	3234	3242
	Tvrlost HB	133		136		146		152	

Vzorek č. 1 má dvě nevyhovující místa, kde je rychlost šíření ultrazvuku podkročena pod minimální možnou mez. V místě 2b je to $3227 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v místě 4b $3239 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Největší pokles rychlosti je v bodě 2b. Hodnoty tvrdostí jsem naměřil od 138 HB do 144 HB.

Vzorek č. 2 obsahuje tři místa měření s nevyhovující rychlostí ultrazvuku. Bod 3a $3234 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 3b $3239 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 4a $3229 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Největší pokles rychlosti je v bodě 4a. Naměřené hodnoty tvrdostí od 137 HB do 147 HB.

Vzorek č. 3 má tři nevyhovující měřená místa, bod 1a $3237 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, bod 2a $3228 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a bod 4b s hodnotou $3227 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hodnoty tvrdostí jsem naměřil v rozmezí od 130 HB do 158 HB.

Vzorek č. 4 obsahuje body 1a, 2a, 3a, 4a s hodnotami rychlostí $3239 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $3233 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $3235 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $3234 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vzorek je nevyhovující. Hodnoty tvrdostí od 133 HB do 152 HB.



Obrázek 47 Vzorky 1-4 před opakovaným tepelným zpracováním (pozn. Tepelné zpracování označené bílou barvou neplatí - původní uvažovaný návrh)

4.3 Realizace navrženého tepelného zpracování vzorků

Po proměření vzorků následovalo tepelné zpracování vzorků č. 2, č. 3, č. 4 podle návrhu (Tabulka 7). Po těchto operacích byly vzorky předány na opracování okujeného povrchu. Plochy polotovarů byly broušeny. Úběr činil přibližně 0,4 mm na plochu.



Obrázek 48 Tepelné zpracování vzorků 2 až 4

Tabulka 9 Hodnoty rychlostí c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a tvrdosti HB po opakovaném tepelném zpracování; červeně jsou označeny nevyhovující hodnoty rychlostí

Vzorek		Kontrolní body polotovaru							
		1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
Č. 2	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3243	3241	3241	3239	3244	3245	3244	3240
	Tvrдость HB	129		128		129		131	
Č. 3	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3238	3235	3231	3231	3233	3233	3231	3232
	Tvrдость HB	269		278		217		244	
Č. 4	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3250	3250	3241	3241	3249	3249	3247	3245
	Tvrдость HB	172		182		172		179	

U vzorku č.2 nebylo dosaženo normalizačním žiháním úpravy rychlostí příčných vln do požadovaného rozmezí ve všech kontrolních bodech. Naměřené hodnoty se pohybují kolem minimální požadované rychlosti, jediným nevyhovujícím kontrolním bodem je bod č. 2b. Vzorek je nevyhovující.

Vzorek č.3 byl normalizačně žihán a zakalen. Z Tabulky 9 Tabulka 9 jednoznačně vyplývá, že aplikací tohoto tepelného zpracování došlo v materiálu k poklesu hodnot rychlostí příčných vln ve všech kontrolních bodech a zároveň k nárůstu tvrdosti materiálu (od 217 HB do 278 HB). Z pohledu rychlostí je celý vzorek č.3 nevyhovující.

U vzorku č.4 byl tepelný předpis kompletně zopakován. Výsledky podle Tabulky 9 ukazují pozitivní úpravu rychlostí (zelené hodnoty). Popuštění proběhlo na hodnoty od 172 HB do 182 HB. Kontrolní měření zákazníkem potvrdilo vyhovující výsledky rychlostí. Polotovaz byl po kompletním opakování tepelného předpisu vyhovující.

4.4 Referenční vzorek

K rozboru struktury jsem měl k dispozici 4 vzorky s různým stadiem tepelného zpracování. Referenční vzorek č. 5 jsem podrobil zkoušce měření rychlosti a tvrdosti. To proběhlo ve všech čtyřech kontrolních bodech s tím rozdílem, že bod č. 1 (1a, 1b) byl posunut mimo vývrt $\varnothing 50$ mm (Obrázek 49).



Obrázek 49 Vzorek č. 5 (referenční)

Tabulka 10 Rychlosti šíření ultrazvuku ve vzorku č. 5

Vzorek		Kontrolní body polotovaru							
		1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
Č. 5	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3250	3253	3255	3258	3250	3252	3248	3257
	Tvrдость HB	151		153		150		141	

Rychlost šíření ultrazvuku byla v referenčním materiálu v rozmezí od $3248 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $3258 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tvrдость materiálu odpovídala hodnotám od 141 HB do 153 HB.

4.5 Ověření chemického složení

Vzorky č. 1 až č. 4 byly vyrobeny z materiálu S355J0 tavby 39961 (viz. Tabulka 4). Pro ověření chemického složení vzorků a pro porovnání s materiálovým atestem jsem navrhl chemický rozbor materiálu před realizací strukturního rozboru.

Referenční vzorek č. 5 nebyl v porovnání se vzorky č. 1 až č. 4 tak dobře identifikovatelný. Protože to byl vzorek několik let starý, u zákazníka označen jako neshodný kus (mechanická deformace-průhyb), nepodařilo se mi do konce termínu

odevzdání této práce dohledat materiálový atest. Pouze z informací zákazníka vím, že to byl výkovek vyrobený v SaS. Z těchto informací jsem mohl předpokládat, že to byl materiál nakupovaný z TŽ. Bohužel se mi v databázích TŽ podle chemického složení nepodařilo dohledat tavbu materiálu. Na další postup mé práce to nebude mít zásadní vliv, pouze zde uvedu zjištěné chemické složení.

Tabulka 11 Chemické složení tavby 39961 (Příloha B)

Chemické složení [%] dle atestu										
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	N	Mo	V
0,16	1,30	0,34	0,020	0,007	0,04	0,09	0,03	0,0029	0,012	0,003
Ověření chemického složení [%] VŠB–TUO										
0,16	1,32	0,36	0,017	0,0040	0,038	0,09	0,041	-	0,010	0,002

Chemickým rozбором bylo ověřeno chemické složení prvků tavby 39961. S drobnými odchylkami v obsahu některých prvků bylo potvrzeno, že vzorky č.1 až č. 4 jsou vyrobeny z materiálu S355J0 tavby 39961, jak je uvedeno v materiálovém atestu (viz. Příloha B). Cílem rozboru vzorku č. 5 bylo určit pouze jeho chemické složení prvků. Spárování s konkrétním materiálovým atestem nebylo provedeno. Porovnání jsem provedl s tavnou 39961.

Tabulka 12 Porovnání chemického složení vzorku č.5

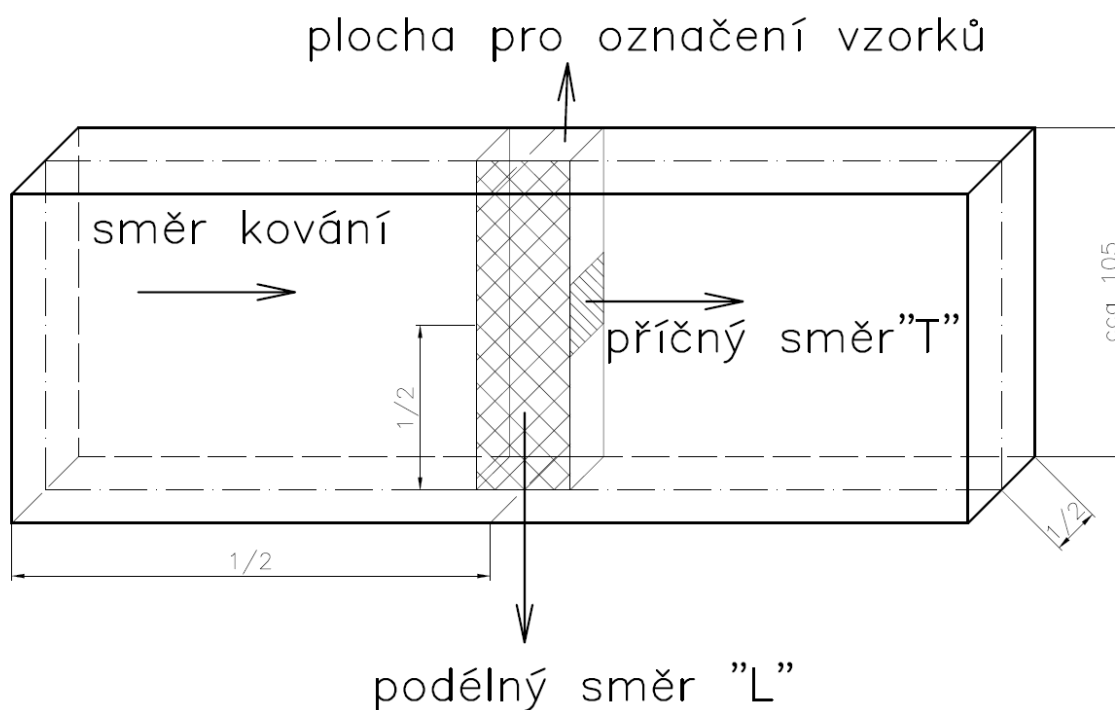
Chemické složení [%] vzorků č. 1 až č. 4 dle atestu tavby 39961										
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	N	Mo	V
0,16	1,30	0,34	0,020	0,007	0,04	0,09	0,03	0,0029	0,012	0,003
Chemické složení [%] vzorku č. 5 podle VŠB–TUO										
0,18	0,88	0,35	0,008	0,007	0,025	0,204	0,029	-	0,021	0,001

V referenčním vzorku č. 5 byl naměřen vyšší obsah chromu 0,204 %, nižší obsah manganu 0,88 % a fosforu 0,008 %. Nebyl naměřen obsah dusíku. Ostatní prvky jako C, S, Si, Cu, Ni, Mo, se liší v malých rozdílech.

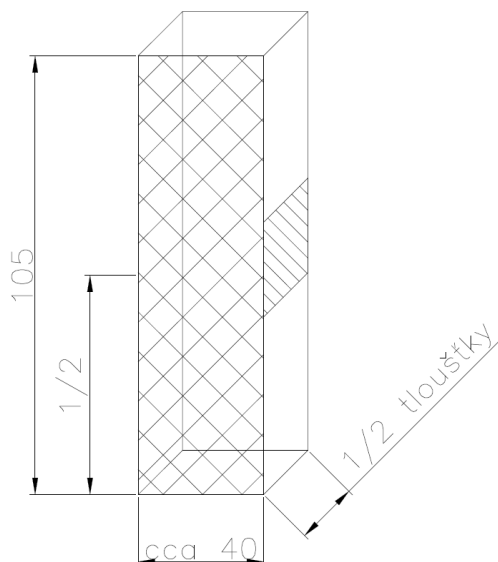
4.6 Strukturní rozbor

Nářezový plán

Pro výběr vzorků jsem zvolil jako reprezentativní místo odběru ve směru kování vzorek o šířce cca 40 mm z oblasti kontrolního bodu č. 2. Pro rozbor makrostruktury a mikrostruktury v podélném směru byly vzorky frézovány na poloviční rozměr, do osy tloušťky materiálu (Obrázek 50, čtverečková oblast „L“). Plocha pro rozbor mikrostruktury v příčném směru byla připravena z plochy kolmé k ploše v podélném směru (Obrázek 50, šrafovaná oblast „T“). Takto předpracované vzorky byly v laboratořích VŠB–TUO připraveny k rozborům.



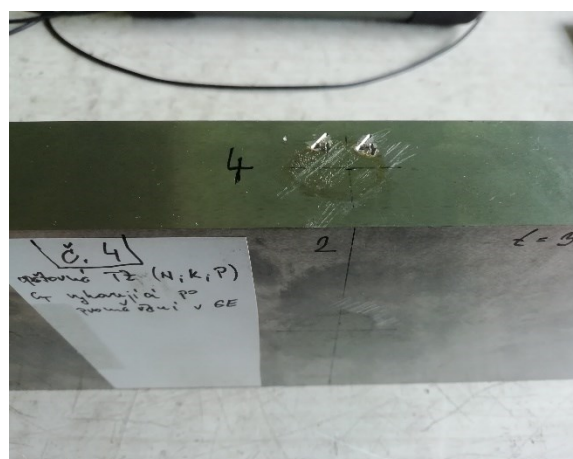
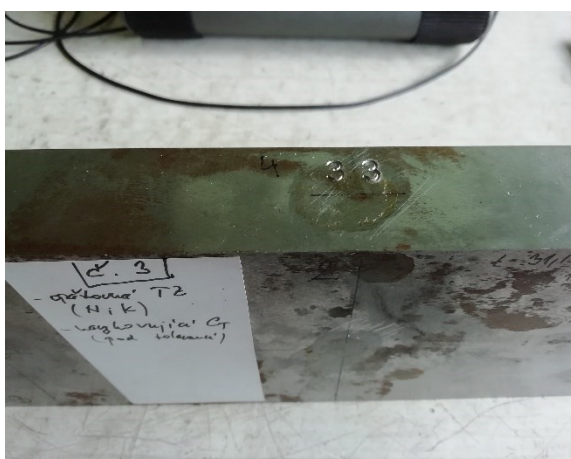
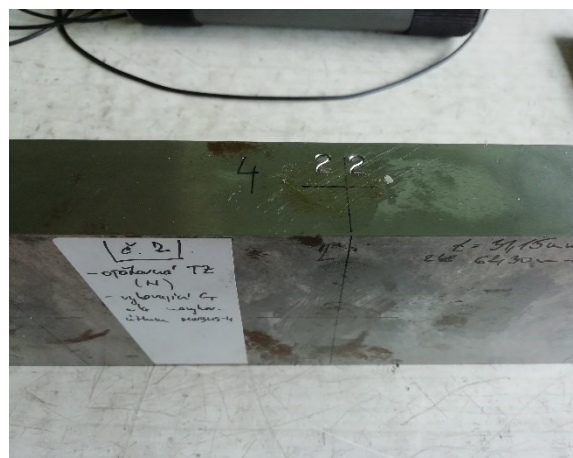
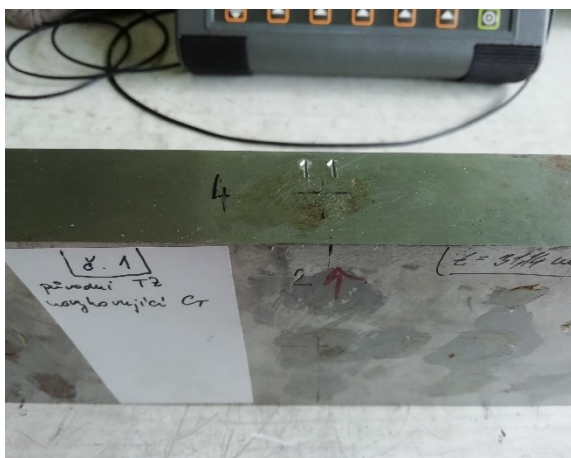
Obrázek 50 Nářezový plán



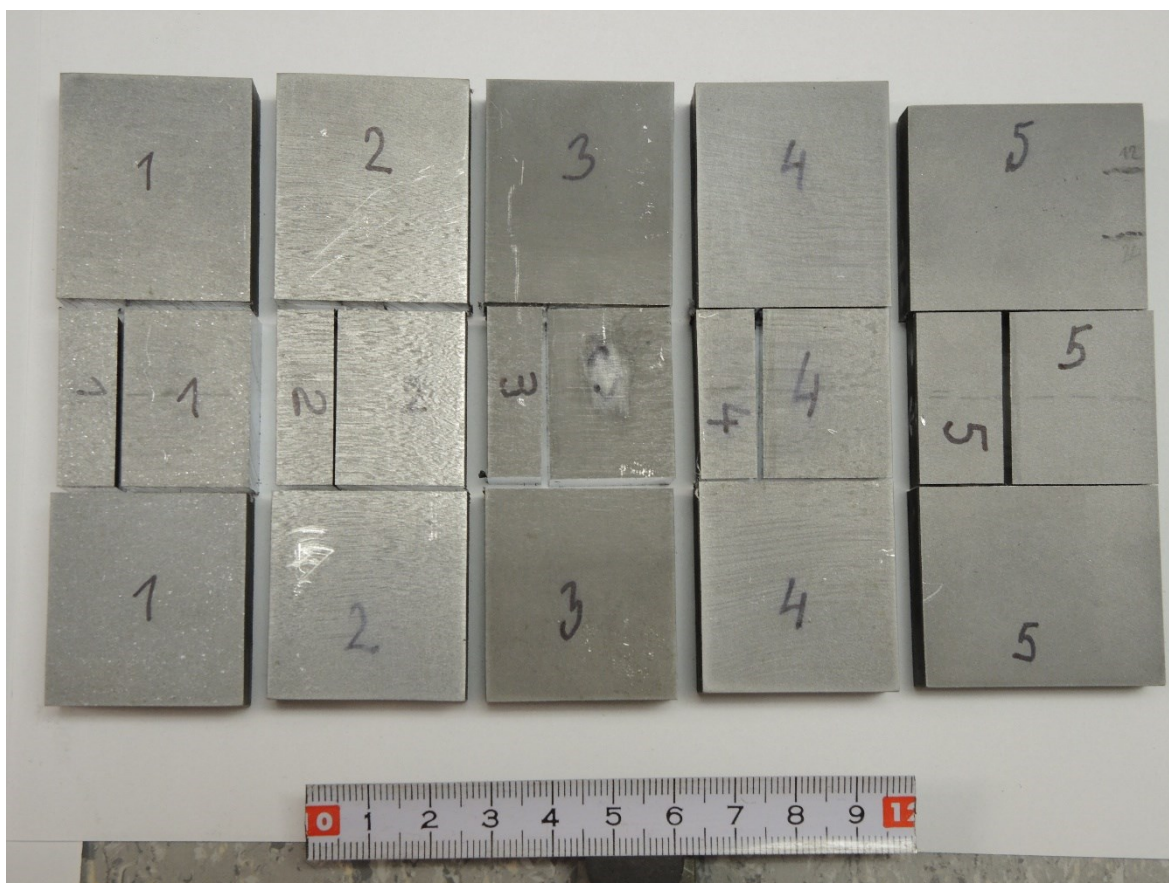
Obrázek 51 Detail vzorku

Značení vzorků

Polotovar, ze kterého jsou vzorky odebírány jsem označil jednou číslicí, tedy 1 až 5. Výřez ze středové oblasti okolo kontrolního bodu č. 2 šířky cca 30 mm až 40 mm bude mít zdvojené označení – např. polotovar č. 1 a jeho výřez č. 11 až po referenční kus č. 5 s označením výřezu č. 55. Identifikaci jsem provedl z horní části polotovaru pevnými číselnými razidly (Obrázek 52). Pro rozlišení makro a mikro snímků struktury materiálu jsem zvolil označení *L* pro podélný směr a *T* pro příčný směr (Obrázek 50). Například snímek makrostruktury z polotovaru č. 1 v podélném směru bude mít označení „Makro 11L“. Snímek mikrostruktury polotovaru č. 3 v příčném směru označím jako „Mikro 33T“.



Obrázek 52 Označení vzorků 11, 22, 33, 44, 55



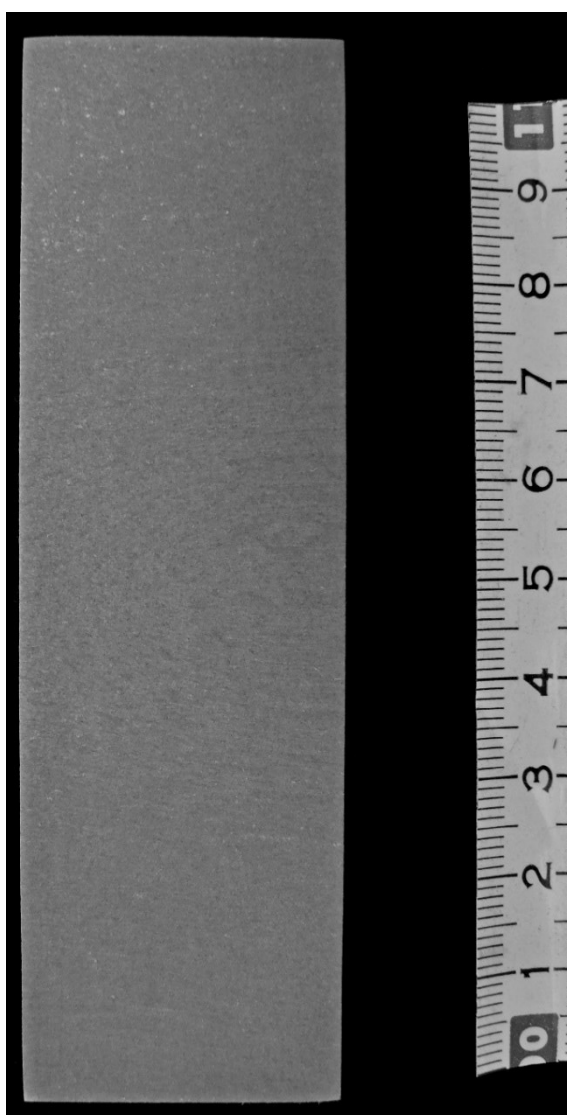
Obrázek 53 Připravené vzorky podle nářezového plánu

Struktura vzorku č. 1

Vzorek č. 1 byl odebrán z volně kovaného výkovku, který byl po vykování normalizačně žíhán, zakalen a popuštěn. Nedošlo k homogenizaci struktury, o čemž svědčí výskyt vycezenin a výrazných shluků feritu.

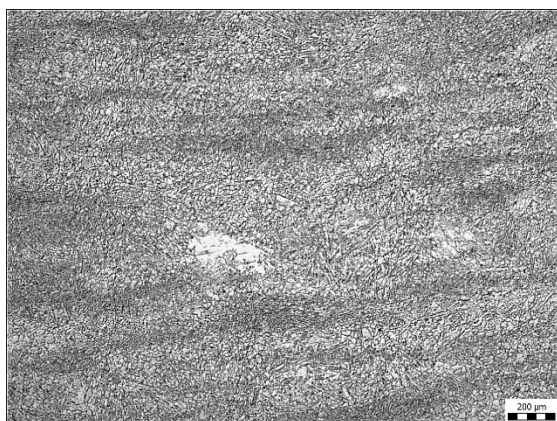
Na makroleptu je patrný náznak vycezenin různé orientace, což bylo ovlivněno technologií volného kování. V podpovrchové oblasti se vyskytují světlá vycezená místa.

Mikrostruktura je nerovnoměrná, tvořená popuštěným bainitem a ostrůvky feritu (bílé skvrny na makrostruktuře). U daného vzorku se vyskytují vycezená pásma, která charakterizují výskyt chemické heterogenity.



Obrázek 54 Makro 11L

Podélný směr L

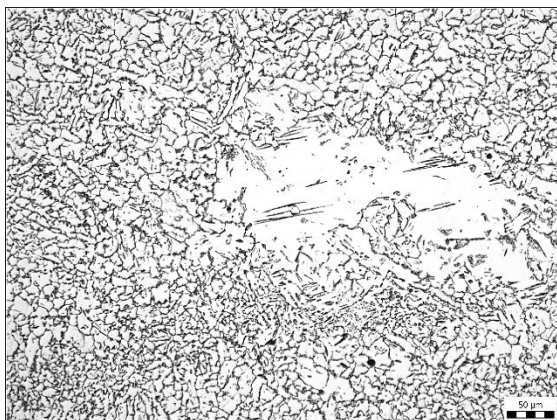


Obrázek 55 Mikro 11L – zvětšeno 50×

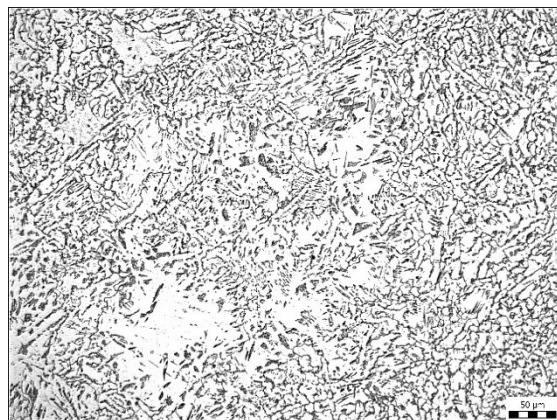
Příčný směr T



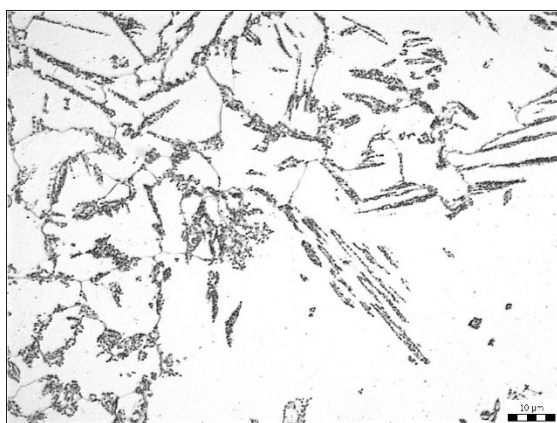
Obrázek 56 Mikro 11T – zvětšeno 50×



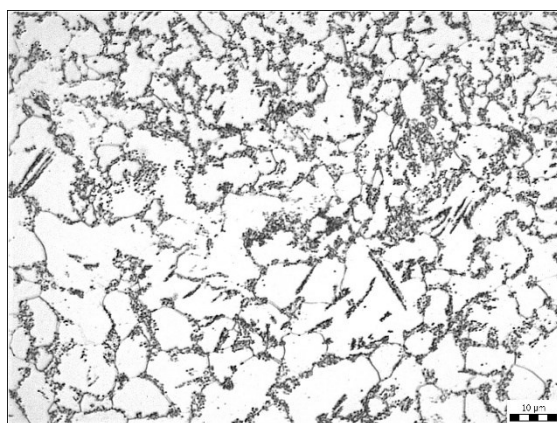
Obrázek 57 Mikro 11L – zvětšeno 200×



Obrázek 58 Mikro 11T – zvětšeno 200×



Obrázek 59 Mikro 11L – zvětšeno 1000×



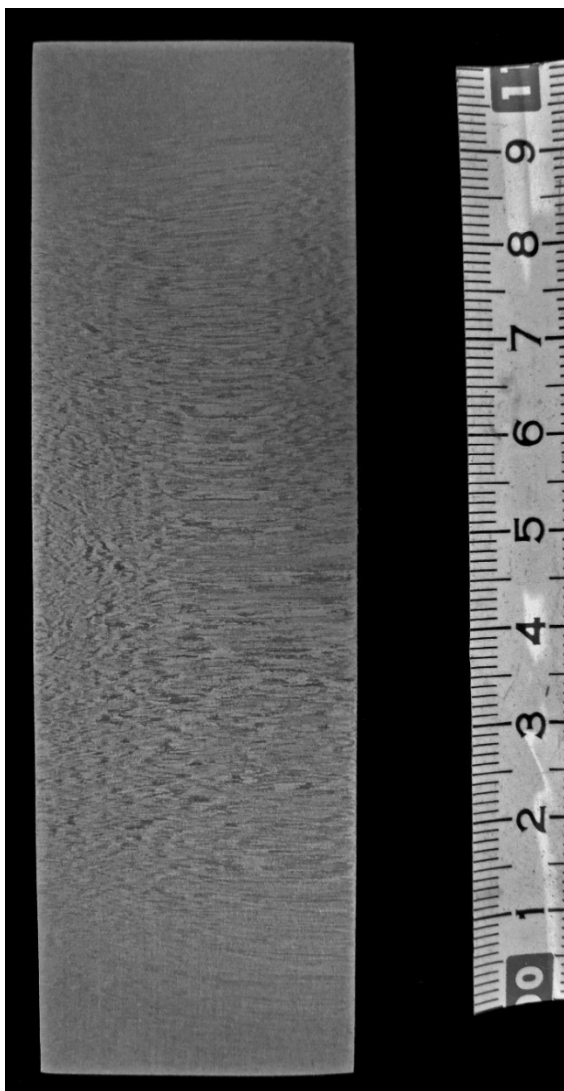
Obrázek 60 Mikro 11T – zvětšeno 1000×

Struktura vzorku č. 2

Daný vzorek byl podroben normalizačnímu žíhání, které však výrazné vycezeniny neodstranilo. Vhodnější by bylo použít homogenizační žíhání, při kterém může dojít k mikrodifuzním pochodům uvnitř materiálu.

Na makroleptu jsou patrné vycezeniny usměrněné rovnoběžně s povrchem, avšak i v tomto případě je patrné jejich porušení v důsledku nerovnoměrnosti volného kování.

Mikrostruktura vykazuje řádkovitost a je tvořená rovnoměrnými zrny feritu a lamelárním perlitem. I zde se vyskytují výrazné shluky charakteristické pro chemickou mikroheterogenitu materiálu a mikrostruktura uvnitř těchto shluků je často tvořená nodulemi lamelárního perlitu a feritem vytvářející nesouvislé síťoví.



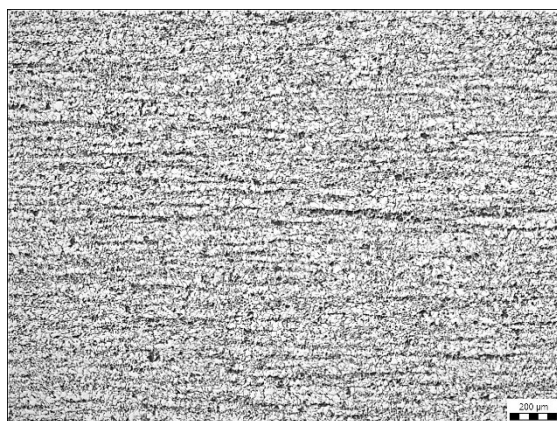
Obrázek 61 Makro 22L

Podélný směr L

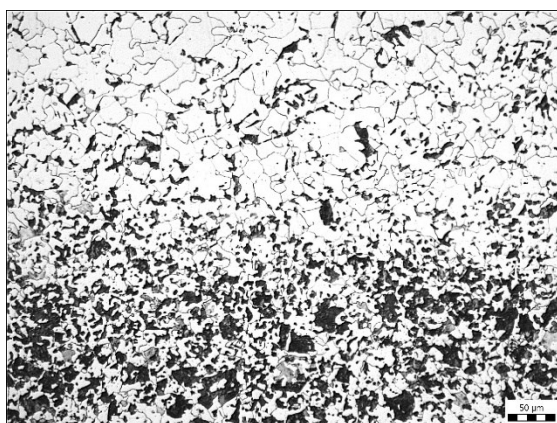


Obrázek 62 Mikro 22L – zvětšeno 50×

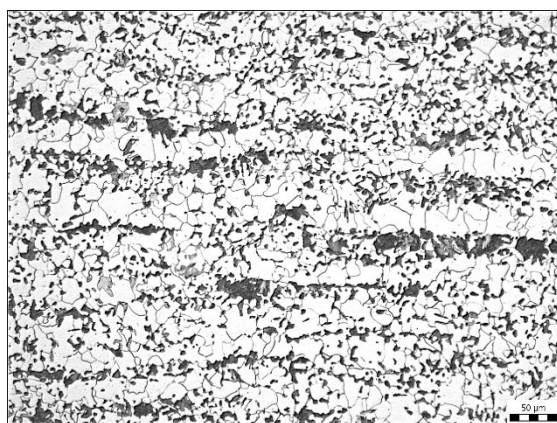
Příčný směr T



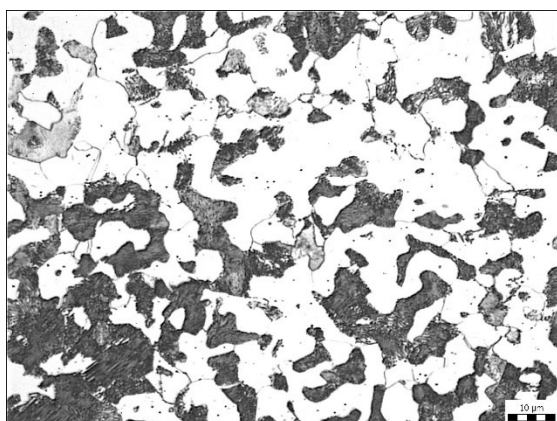
Obrázek 63 Mikro 22T – zvětšeno 50×



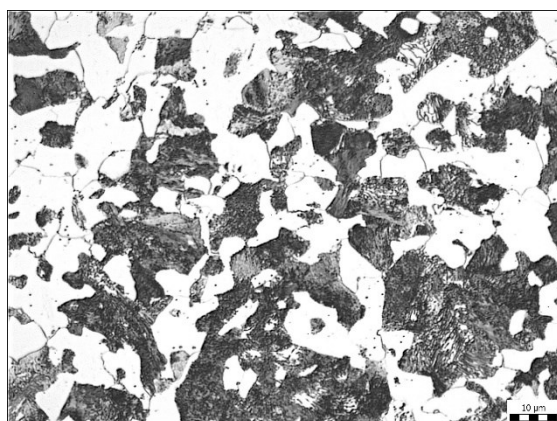
Obrázek 64 Mikro 22L – zvětšeno 200×



Obrázek 65 Mikro 22T – zvětšeno 200×



Obrázek 66 Mikro 22L – zvětšeno 1000×

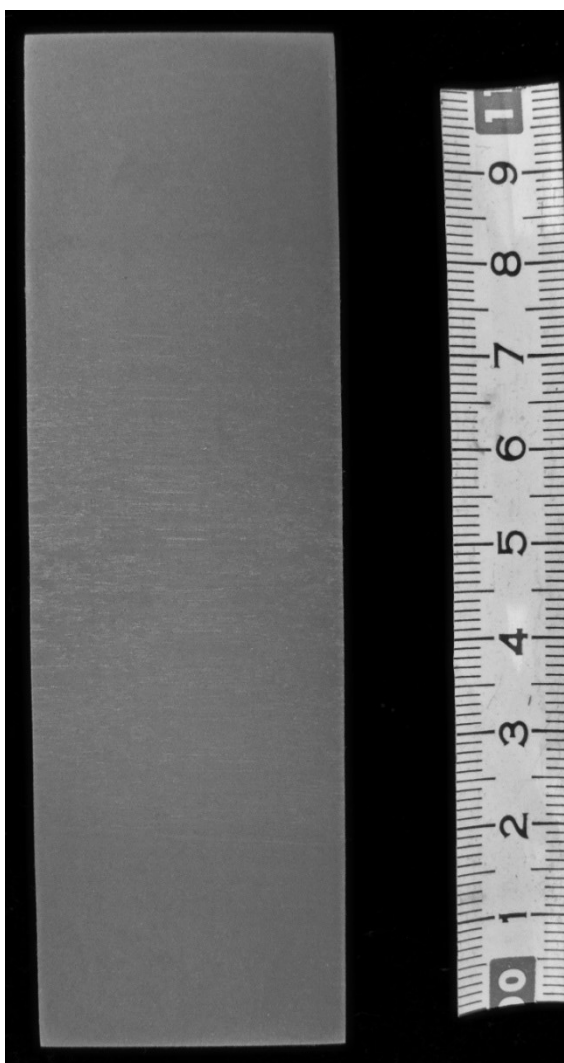


Obrázek 67 Mikro 22T – zvětšeno 1000×

Struktura vzorku č. 3

Vzorek č. 3 byl normalizačně žíhán a zakalen. Na makroleptu jsou patrné vycezeniny rovnoběžné s povrchem, ojedinělé světlé skvrny uvnitř materiálu. Tyto vycezeniny nejsou přerušovány shluky neusměrněných vycezenin.

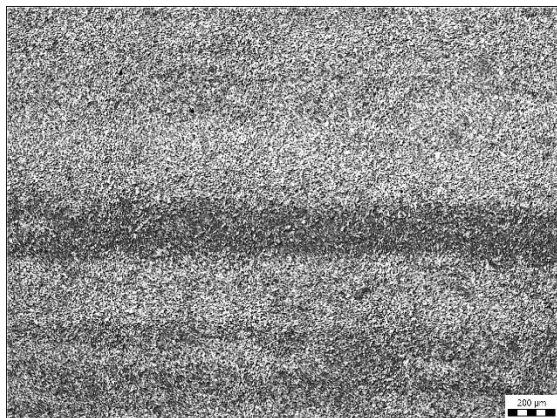
Mikrostruktura je tvořená bainitem, feritem a perlitem. Samotné výrazné vycezené oblasti mají mikrostrukturu tvořenou bainitem a ojedinělým perlitem. Mikrostruktura jeví náznak mírného popuštění. To mohlo být způsobeno během procesu kalení, kdy výkovek byl vytažen z vody za teploty okolo 300 °C a došlo k samopopuštění.



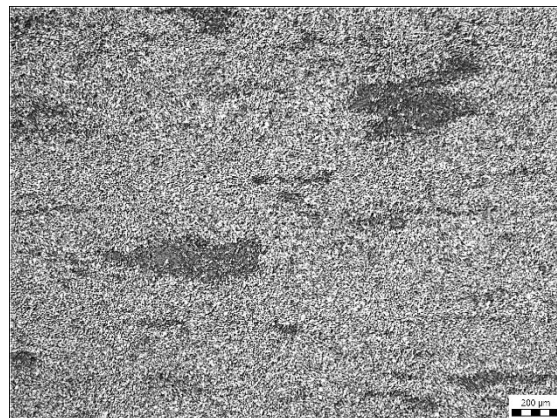
Obrázek 68 Makro 33L

Podélný směr L

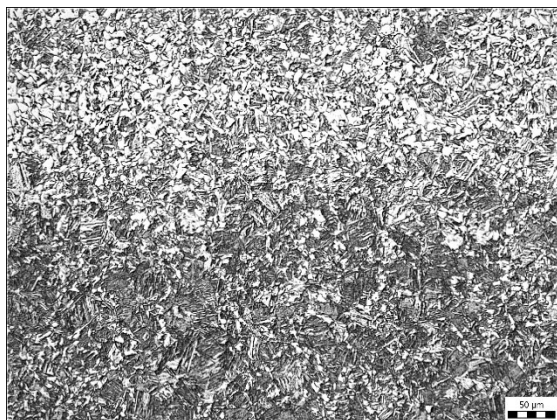
Příčný směr T



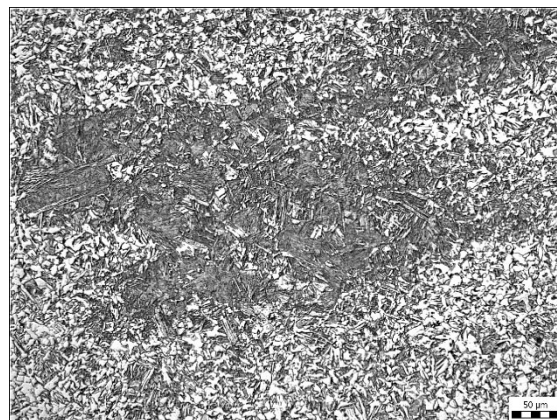
Obrázek 69 Mikro 33L – zvětšeno 50×



Obrázek 70 Mikro 33T – zvětšeno 50×



Obrázek 71 Mikro 33L – zvětšeno 200×



Obrázek 72 Mikro 33T – zvětšeno 200×



Obrázek 73 Mikro 33L – zvětšeno 1000×

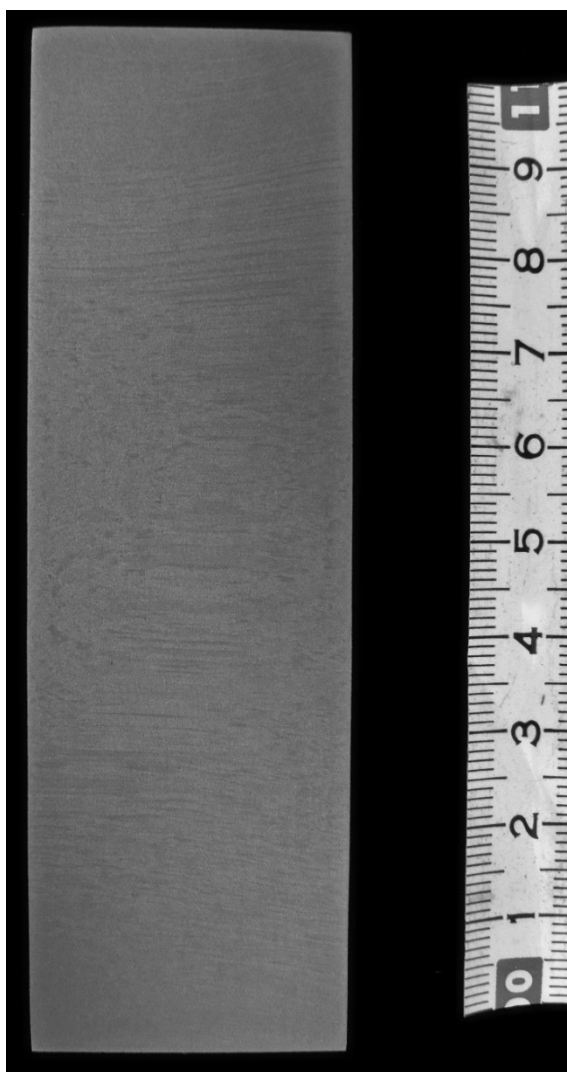


Obrázek 74 – zvětšeno 1000×

Struktura vzorku č. 4

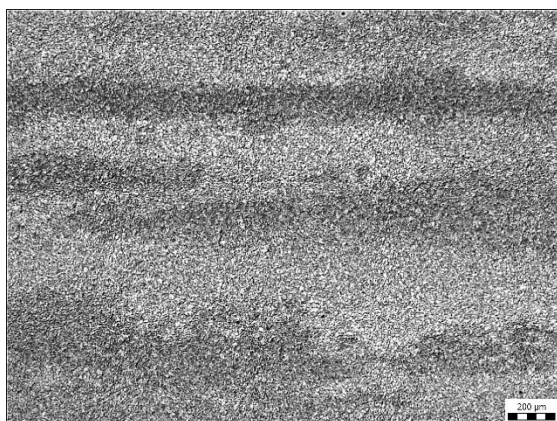
Daný materiál byl normalizačně žíhán, zakalen a výrazně popuštěn. Ve středové části se vyskytují oblasti, uvnitř kterých nedošlo k jejich výraznějšímu usměrnění.

Mikrostruktura je výrazně popuštěná, tvořená bainitem, feritem a perlitem. Ve vycezených oblastech je mikrostruktura tvořena popuštěným bainitem a ojedinělým feritem.



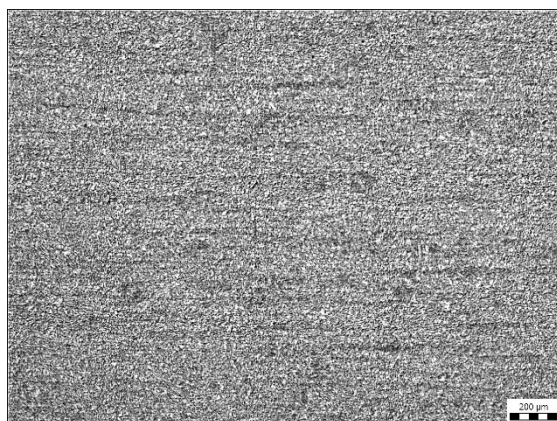
Obrázek 75 Makro 44L

Podélný směr L

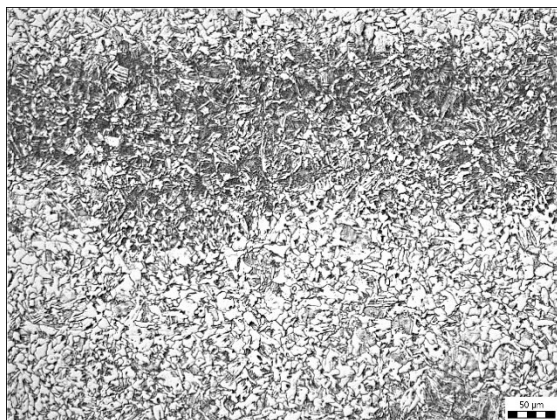


Obrázek 76 Mikro 44L – zvětšeno 50×

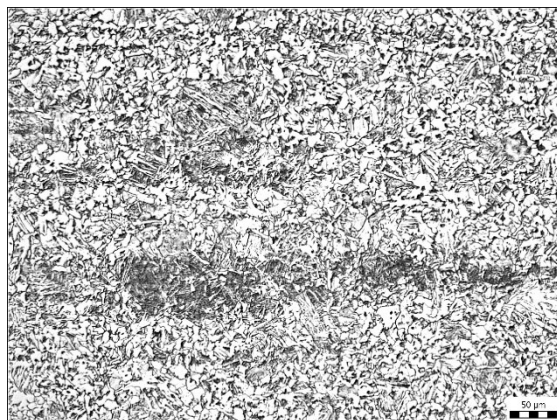
Příčný směr T



Obrázek 77 Mikro 44T – zvětšeno 50×



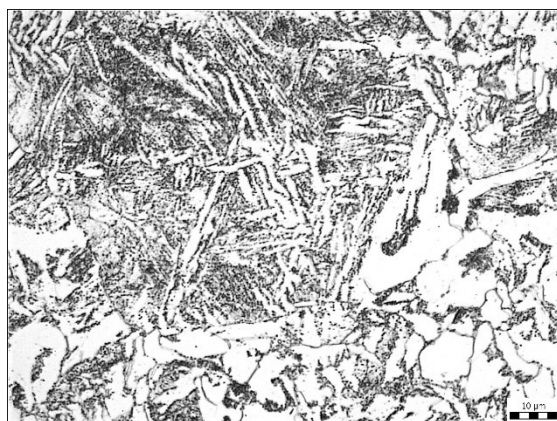
Obrázek 78 Mikro 44L – zvětšeno 200×



Obrázek 79 Mikro 44T – zvětšeno 200×



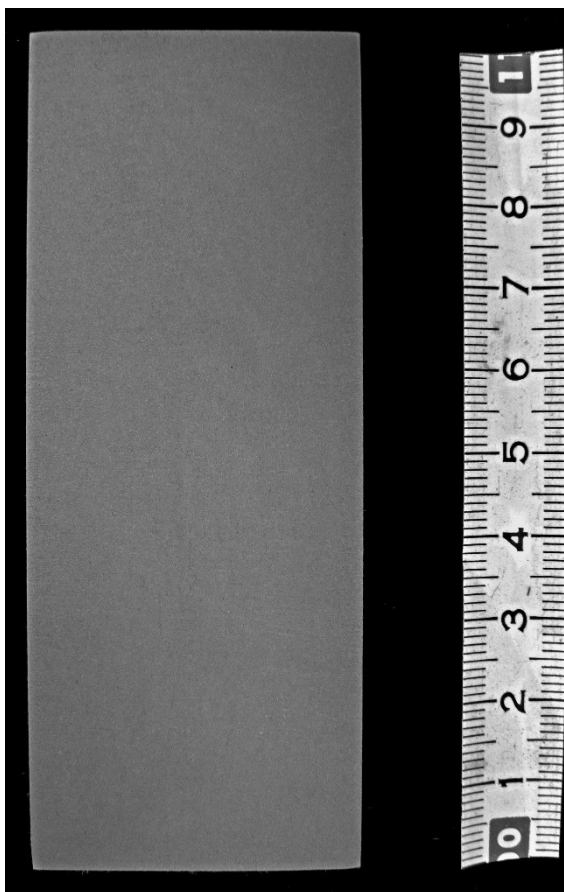
Obrázek 80 Mikro 44L – zvětšeno 1000×



Obrázek 81 Mikro 44T – zvětšeno 1000×

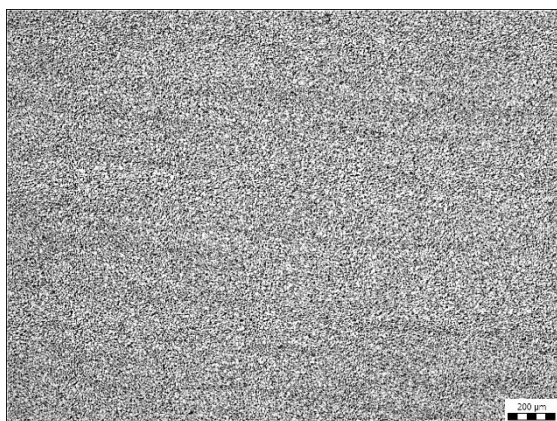
Struktura vzorku č. 5

Materiál byl normalizován a popuštěn. Na makroleptu nejsou patrné výraznější nedokonalosti. Je zde vidět jemný náznak vycezenin rovnoběžných se samotným povrchem. Mikrostruktura je rovnoměrná, homogenní, tvořená feritem a perlitem. Daný vzorek vykazuje náznak popuštění po normalizaci nebo řízeném vychlazování.



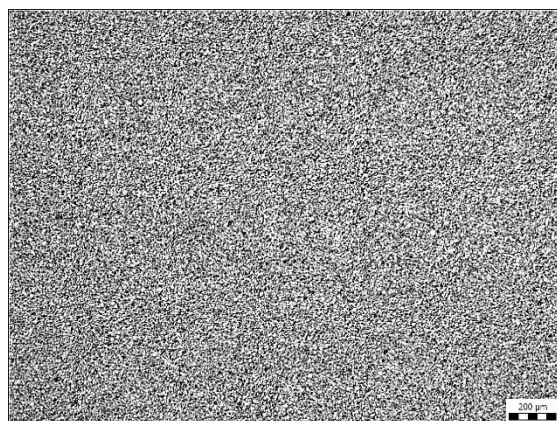
Obrázek 82 Makro 55L

Podélný směr L

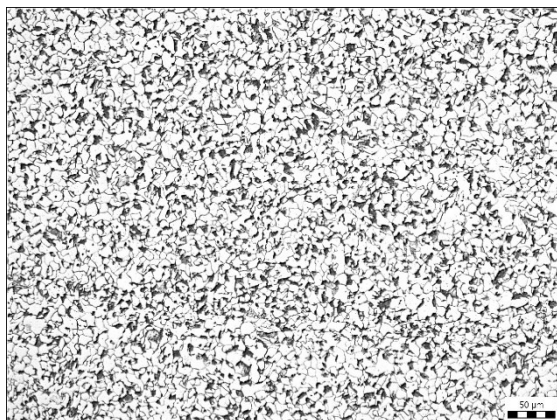


Obrázek 83 Mikro 55L – zvětšeno 50×

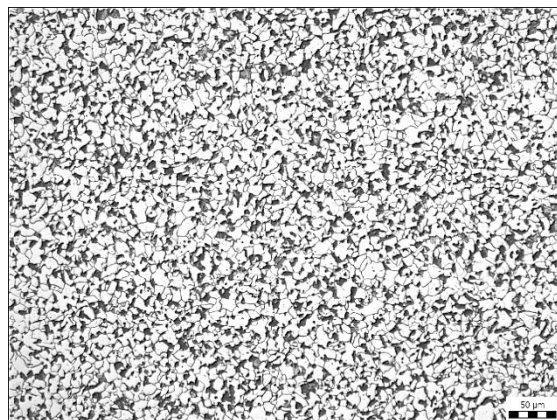
Příčný směr T



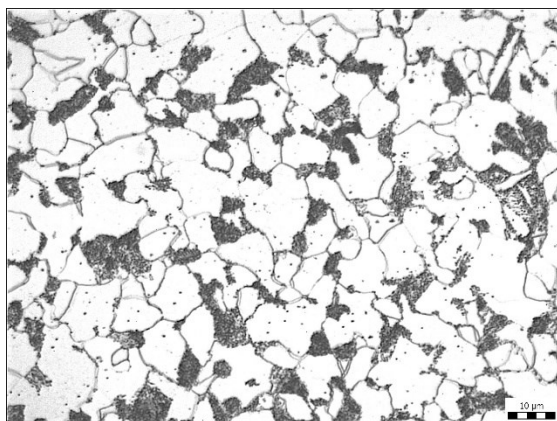
Obrázek 84 Mikro 55T – zvětšeno 50×



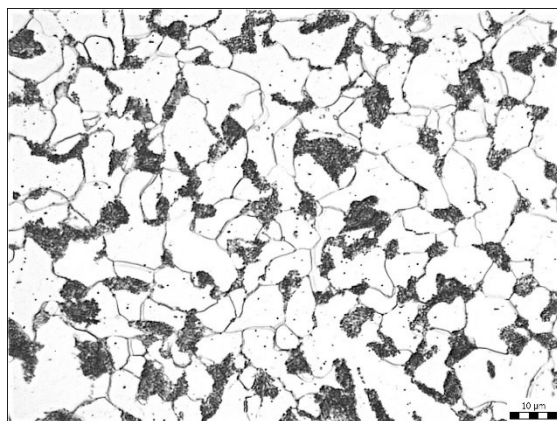
Obrázek 85 Mikro 55L – zvětšeno 200×



Obrázek 86 Mikro 55T – zvětšeno 200×



Obrázek 87 Mikro 55L – zvětšeno 1000×



Obrázek 88 Mikro 55T – zvětšeno 1000×

4.7 Oprava 13ks polotovarů

Na základě dosažených pozitivních výsledků měření rychlosti ultrazvuku v opraveném polotovaru č. 4 (Tabulka 9), kdy v definovaných bodech (1 až 4) a v obou směrech zkoušení (a, b) byla opětovným tepelným zpracováním (Tabulka 5) upravena rychlost šíření příčných ultrazvukových vln, jsem přistoupil k otestování většího množství nevyhovujících polotovarů.

V nové objednávce ze začátku roku 2019 byl požadavek na výrobu 200ks polotovarů. Zakázka měla být vykována z materiálu S355J0 a č. tavby 21371. V kovárně byl ještě k dispozici zbytek bloku 280 mm × 280 mm × 1500 mm problematické tavby č. 39961. Po dohodě s přípravou výroby SaS (Mechanické dílny) byla zakázka vykována následovně:

- 150 ks polotovarů z nové tavby 21371,
- a 50 ks z tavby č. 39961.



Obrázek 89 Polotovary 50ks tavba 39961



Obrázek 90 Neshodné polotovary (část)
připravené k opětovnému tepelnému zpracování

Výkovky zhotovené z tavby 39961 jsem označil v pořadí od 150 do 200 (50ks). V tabulce dole uvádím hodnoty naměřených rychlostí pro nevyhovující polotovary s původním číselným označením. Měření tvrdosti jsem již neprováděl.

Tabulka 13 Naměřené rychlosti ultrazvuku v 13ks nevyhovujících polotovaru

Polotovar měrky		Kontrolní body polotovaru							
		1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
Č. 156	Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] $3255 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \pm 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	3248	3245	3243	3238	3248	3236	3241	3244
Č. 165		3247	3240	3251	3245	3251	3240	3236	3238
Č. 167		3252	3237	3251	3232	3244	3239	3250	3251
Č. 172		3246	3238	3250	3249	3248	3239	3248	3249
Č. 176		3241	3236	3243	3241	3241	3244	3239	3243
Č. 178		3247	3246	3245	3248	3247	3237	3245	3247
Č. 179		3244	3248	3252	3240	3252	3240	3236	3235
Č. 180		3253	3237	3249	3241	3253	3236	3239	3245
Č. 181		3252	3237	3249	3240	3251	3236	3249	3251
Č. 185		3252	3237	3240	3230	3253	3237	3236	3241
Č. 188		3249	3241	3244	3237	3246	3243	3246	3244
Č. 193		3241	3234	3250	3241	3251	3240	3236	3239
Č. 196		3246	3236	3250	3239	3244	3230	3244	3237

Výsledky nevyhovujících rychlostí ultrazvuku jsou uvedeny v Tabulce 13 červeně. Hodnoty rychlostí jsou v intervalu od $3230 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $3239 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nejčastějším směrem s nevyhovujícími hodnotami je směr *b* (1b, 2b, 3b). Zároveň je tento směr zkoušení shodný se směrem kování. Ve směrech zkoušení 1a, 2a, 3a, což jsou směry kolmé na směr kování, jsou všechny hodnoty rychlostí vyhovující.

Tabulka 14 Naměřené rychlosti ultrazvuku v 13ks opravených polotovarech

Polotovar měrky		Kontrolní body polotovaru							
		1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
Č. 156	<p>Rychlost c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]</p> <p>$3255 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \pm 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$</p>	3248	3249	3247	3247	3250	3248	3248	3247
Č. 165		3248	3248	3248	3248	3249	3248	3249	3249
Č. 167		3247	3246	3246	3245	3248	3248	3248	3249
Č. 172		3253	3251	3251	3251	3250	3249	3249	3249
Č. 176		3250	3250	3250	3249	3249	3250	3247	3248
Č. 178		3252	3252	3249	3250	3248	3247	3247	3248
Č. 179		3248	3249	3249	3247	3246	3245	3247	3247
Č. 180		3247	3246	3248	3247	3247	3244	3248	3248
Č. 181		3249	3248	3246	3246	3249	3247	3248	3248
Č. 185		3243	3243	3245	3245	3250	3250	3247	3247
Č. 188		3249	3248	3248	3247	3247	3247	3247	3247
Č. 193		3247	3247	3246	3246	3248	3246	3247	3247
Č. 196		3250	3248	3250	3249	3248	3247	3248	3249

Po opakování tepelného zpracování jsem měřením rychlosti ultrazvuku prokázal pozitivní vliv na hodnoty rychlostí. Všechny nevyhovující hodnoty uvedené v Tabulce 13 byly upraveny a všech 13ks polotovaru bylo po kompletním proměření vráceno zpět do výroby.

5. Ekonomika návratu neshodných kusů do výroby

5.1 Kompletní výroba série 200ks

Tabulka 15 Náklady na 1ks při výrobě 200 ks

Operace	Náklady na 200ks	Náklady na 1ks
Normalizační žihání	8 886 Kč	44,40 Kč
Žihání na odstr. pnutí	6 873 Kč	34,40 Kč
Kalení	14 787 Kč	73,90 Kč
Popouštění	6 595 Kč	32,90 Kč
TZ celkem	37 141 Kč	185,70 Kč
Opracování Rz16	30 917 Kč	154,60 Kč
Ostatní (materiál, kování, atd.)	247 742 Kč	1238,70 Kč
Celkem	315 800 Kč	1 579 Kč

Výroba 200ks polotovarů měrek stojí 315 800 Kč. Z této částky připadá na tepelné zpracování 37 141 Kč a strojní opracování na Rz16 30 917 Kč. Ostatní náklady, jako materiál, kování apod. tvoří částku 247 742 Kč.

5.2 Opakované tepelné zpracování 13ks

Tabulka 16 Náklady na opravu 13 ks

Operace	Náklady na 13 ks	Náklady na 1 ks
Tepelné zpracování (NŽ,SP,K, P)	3515 Kč	270,40 Kč
Opracování Rz16	2010 Kč	154,60 Kč
Celkem	5525 Kč	425 Kč

Opravované kusy pocházejí ze zakázky, která obsahovala 200ks vyrobených polotovarů se shodnými náklady uvedenými v Tabulce 15. Oprava 13ks neshodných kusů stála 5 525 Kč. Náklady na opakované tepelné zpracování činily celkem 3 515 Kč a zbytek tvořily náklady na opracování ve výši 2010 Kč.

Opakovaným tepelným zpracováním se povedlo opravit 13ks výkovků s nevyhovujícími hodnotami rychlosti šíření příčných ultrazvukových vln. Po tomto úspěšném potvrzení méj úvahy jsem doporučil uvolnit k opravě 207ks nevyhovujících polotovarů tavby 39961. Náhrada novými kusy nebude realizována. Do termínu odevzdání mé práce se nepodařilo kompletně provést opravu neshodných kusů. Náklady na tepelné zpracování a strojní opracování jednoho kusu budou shodné jako u výroby série 200 nových kusů.

5.3 Náklady na opravu 207ks

Pro výpočet celkových nákladů na novou výrobu 207ks použiju náklady pro výrobu série 200ks. Znamená to, že výroba jednoho nového kusu výkovku bude stát shodně při výrobě 200ks i 207ks.

Tabulka 17 Náklady na opravu 207ks

Operace	Náklady na 200ks (nové kusy)	Náklady na 1ks (nový kus)	Náklady na 207ks (nový kus)	Náklady na 207ks (oprava)	Náklady na 1ks (oprava)
Normalizační žihání	8 886 Kč	44,40 Kč	9 190,80 Kč	9 190,80 Kč	44,40 Kč
Žihání na odstr. pnutí	6 873 Kč	34,40 Kč	7 120,80 Kč	7 120,80 Kč	34,40 Kč
Kalení	14 787 Kč	73,90 Kč	15 297,30 Kč	15 297,30 Kč	73,90 Kč
Popouštění	6 595 Kč	32,90 Kč	6 810,30 Kč	6 810,30 Kč	32,90 Kč
TZ celkem	37 141 Kč	185,70 Kč	38 439,90 Kč	38 439,90 Kč	185,70 Kč
Opracování Rz16	30 917 Kč	154,60 Kč	32 002,20 Kč	32 002,20 Kč	154,60 Kč
Ostatní (materiál, kování, atd.)	247 742 Kč	1238,70 Kč	256 410,90 Kč	---	---
Celkem	315 800 Kč	1 579 Kč	326 853 Kč	70 442,10 Kč	340,30 Kč

Celkové náklady na výrobu 207ks by činily 326 853 Kč při celkových nákladech na jeden kus 1579 Kč. V případě, že celý objem opravíme tepelným zpracováním, budou celkové náklady na opravu činit 70 442 Kč. Náklady na opravu jednoho kusu činí 340,30 Kč. Rozdíl nákladů na výrobu nového kusu a opravu neshodného kusu činí 1239 Kč při výrobě nebo opravě 200 kusů resp. 207 kusů.

6. Hodnocení výsledků

Na počátku této práce byla nevyhovující rychlost šíření ultrazvuku v 211 kusech výkovků polotovarů kalibrační měřky. Cílem bylo zjistit, zda by bylo možné neshodné kusy opravit a jak se mění rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých fázích tepelného zpracování. Z 211 kusů byly vybrány čtyři vzorky, které byly podrobeny experimentu. Pro zvažovanou opravu zbývalo 207 výkovků.

Všechny čtyři vzorky měly stejný výchozí stav TZ (normalizační žíhání, žíhání na snížení pnutí, kalení a popouštění). Proměřil jsem rychlost a tvrdost ve výchozím stavu. Následně byly vzorky č. 2, č. 3 a č. 4 podrobeny dílčímu tepelnému zpracování. Pro porovnání výsledků jsem zajistil referenční materiál, který zcela splňoval požadavky na hodnoty rychlostí ultrazvuku. S tímto vzorkem č. 5 jsem srovnával naměřené hodnoty rychlostí. Na všech vzorcích jsem v kontrolních bodech proměřil tvrdost materiálu (HB).

Vzorek č. 1 byl ponechán ve výchozím stavu jako nevyhovující ve dvou kontrolních bodech. Vzorek č. 2 byl normalizačně žíhán, ale k nápravě rychlostí ve všech místech nedošlo. Vzorek č. 3 byl oproti vzorku č. 2 navíc zakalen. Všechny hodnoty rychlostí klesly pod dolní mezní hodnotu. Naměřené hodnoty se pohybovaly od $3231 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $3238 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Se zakalením materiálu vzrostla podle očekávání tvrdost materiálu na hodnoty od 217 HB do 278 HB. Můžu tedy učinit závěr, že kalením došlo v materiálu k nárůstu tvrdosti a zároveň ke snížení rychlosti ultrazvuku v materiálu. Vzorek č. 4 po kompletním opakování tepelného režimu vykazoval zcela vyhovující hodnoty rychlostí ultrazvuku v materiálu.

Pro ověření vzorků č. 1 až č. 4 podle materiálového atestu byla v laboratořích VŠB-TUO Ostrava provedena chemická analýza obsahu prvků. Testem se potvrdilo, že vzorky jsou vyrobeny z materiálu doloženého materiálovým atestem. U vzorku č. 5 se mi nepovedlo zajistit materiálový atest, a tak jeho chemické složení bylo porovnáno s chemickým složením vzorků č. 1 až č. 4. Jeho složení prvků se výrazně lišilo v obsahu chromu, manganu a fosforu. Nebyl naměřen dusík. I přes tyto rozdíly se jedná o jakost S355J0, protože obsahy prvků plně vyhovují normě ČSN EN 10025-2.

Všechny vzorky byly podrobeny rozboru a hodnocení struktury materiálu. Ve vzorcích 1 až 4 byly ve struktuře identifikovány pásy vycezenin, které měly totožný směr se směrem

kování. Chemicky byl materiál nehomogenní, což mělo spolu s vycezeninami negativní vliv na rychlost šíření ultrazvuku. Vzorek č. 4 byl dvakrát tepelně zpracován a vykazoval pozitivní úpravu rychlostí ultrazvuku. Přisuzuji to částečné homogenizaci materiálu v průběhu rekrytalizace během opakovaného tepelného zpracování. Struktura referenčního materiálu byla homogenní, tvořená feritem a perlitem. Ve struktuře nebyl identifikován bainit, což ukazuje na to, že vzorek nebyl zakalen, ale byl pouze normalizačně žíhán, nebo řízeně chlazen. Tato struktura vykazovala nejlepší výsledky rychlosti šíření ultrazvuku. Pro další výrobu bych doporučil dodávku kalibračních měrek ve stavu normalizačně žíháním.

Z kladných výsledků měření rychlosti u vzorku č. 4 jsem přistoupil k opravě většího vzorku materiálu. Během období, kdy jsem zpracovával podklady k této práci, bylo na další zakázku vykováno mimo jiné i 50ks polotovarů z problémové tavby 39961. 13ks bylo vyřazeno na nevyhovující rychlosti šíření. Tyto neshodné kusy byly podrobeny znovu kompletnímu tepelnému zpracování s pozitivním výsledkem. Všechny 13ks se povedlo vrátit zpět do výrobního procesu. Na základě tohoto úspěchu bylo přistoupeno k opravě všech původních 207 kusů nevyhovujících výkovků. Zpracování se z časových a kapacitních důvodů ve výrobě nepovedlo před termínem odevzdání této závěrečné práce. Nicméně očekávám kladný výsledek právě na základě výše popsaných dílčích zkoušek. Při opravě neshodných kusů bych zvážil využití homogenizačního žíhání.

Z cenové kalkulace vyplynulo, že oprava tepelným zpracováním bude o 1239 Kč/ks levnější, než náhradní výroba za neshodné kusy.

Všechny poznatky a výsledky zjištěné při zpracovávání této závěrečné práce budou poskytnuty Strojárnám a stavbám Třinec a využity při výrobě dalších polotovarů kalibrační měrky.

Poděkování patří doc. Ing. P. Mohylovi, Ph.D. z Katedry mechanické technologie VŠB-TU Ostrava za vedení diplomové práce, rodině za podporu a vytvoření příznivých podmínek pro studium a zpracování této závěrečné práce. Děkuji.

7. Citovaná literatura

1. REGAZZO, Richard a Marcela, REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk-základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha : BEN - technická literatura, 2013. ISBN 987-80-7300-466-8.
2. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí (nauka o materiálu IV)*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
3. OBRAZ, Jaroslav. *Ultrazvuk v měřicí technice*. Praha : SNTL, 1984.
4. SILBERNAGEL, Arnošt. *Struktura a vlastnosti kovových materiálů*. Ostrava : Kovosil Ostrava, 2004. ISBN 80-901157289.
5. ŠEBESTOVÁ, Hana a Petr, SCHOVÁNEK. Krystalizace ocelí a litin. *Portál moderní fyziky*. [Online] [Citace: 1. duben 2019.] Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm1-p-2.pdf>.
6. Střední průmyslová škola, Ostrava - Vítkovice. *Nauka o materiálu. Střední průmyslová škola, Ostrava - Vítkovice*. [Online] [Citace: 15. únor 2019.] Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT_Nauka_o_materialu_VEC.pdf.
7. MACHEK, Václav a Jaromír, SODOMKA. *Nauka o materiálu: Struktury kovových materiálů*. [Online] Nakladatelství ČVUT, 2006. [Citace: 25. březen 2019.] Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/personal/sodomjar/nauka%20o%20materialu.pdf>. ISBN 80-01-03379-1.
8. JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli*. Praha : SNTL, 1983.
9. Strojírny a stavby Třinec. [Online] [Citace: 24. duben 2019.] Dostupné z: <http://www.sas-trinec.cz/>.
10. ČSN EN ISO 2400. *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Specifikace pro kalibrační měрку číslo 1*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
11. ČSN EN 10025-2. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Praha : Český normalizační institut, 2005.

12. LEINVEBER, Jan a Pavel, VÁVRA. *Strojnické tabulky - Třetí doplněné vydání*. Úvaly : ALBRA, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
13. Podrobnosti o produktu SURFTEST SJ-210. www.mitutoyo.cz. [Online] [Citace: 27. duben 2019.]
14. Ultrazvukový přístroj USM 35X S. www.papco.cz. [Online] [Citace: 26. duben 2019.] Dostupné z: http://www.papco.cz/ke_stazeni/soubor1_3.pdf.
15. CHMIEL, Roman. Stanovení rychlosti šíření ultrazvukových vln v polotovaru kalibrační měrky č. 1. *Bakalářská práce*. 2017.

8. Přílohy

Příloha A Záznamový list

STROJÍŘNÝ A STAVBY TRINEC										Záznamový list										list č.	
Zákazník	Výrobní příkaz				Objednávka				Výkres				Tabula				Počet kusů				
Datum																					
číslo etalonu	rozměry				tvrdost				Sonda (podélné vlny) NB4S				Sonda (příčné vlny) V155								
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					

Příloha B Inspekční certifikát S355J0, T 39961



TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A02 Druh dokumentu / Art der Prüfbescheinigung / Type of inspection document											
Inspekční certifikát 3.1 - Abnahmeprüfzeugnis 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004											
A01/A06 Výrobní závod / Herstellerwerk / Manufacturer						Stránka / Seite / Page					
TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic						A03 Číslo dokumentu / Bescheinigungsnummer / Document No.		1/2			
						2017/05/011679-MAR					
A07 Číslo objednávky / Kundenbestellnummer / Purchaser's order No					A08 Přijímalce / Empfänger / Consignee						
4500917651					Strojírny a stavby Třinec, a.s.						
A10 Číslo kontraktu / Kontraktnummer / Contract No.					Mechan. dílny, Urbanec, pr.0131, Vodárna MD						
A08 Číslo zakázky / Werksauftragsnummer / Manufacturer's order No					739 61 Třinec						
3100030733/000010					Česká republika						
B01, B08-B11 Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Specification of the Product / Maße / Toleranz Produkt description / Dimensions / Tolerance			B02, B04 Označení oceli / Stav dodání Steel designation / Lieferzustand		B03 Materiálová norma Materialnorm Classification standard		B03 Rozměrová norma Maßnorm Dimensional standard				
Bloky čtvercové - Vorblöcke -blooms			S355J0 +AR		EN 10025-2:2004		ČSN 425114				
280/280 mm + 7,000 - 7,000 + 7,00 - 7,00 2,720 m +100 -0											
A11 Dopr. prostředek š. Wagen Nr.	A12 Ložný list š. Ladefliste Nr.	B07 Tavba Schmelze	B08 Kruhy / Kusy Ringen / Stücke	B08 Svazky Krbd	B13 Hmotnost (kg) Gewicht (kg)						
8T95978	3117002180	T39961	4	0	6820						
B07, B14, C70 Tavba / Rok výroby / Způsob výroby Schmelze / Herstellungsjahr / Stahlherstellung Heat No. / Year of production / Steelmaking process		C71-C82 Chemické složení-Chemische Zusammensetzung-Chemical composition [%]									
T39961/2016											
BO-ZPO1		C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	N	Mo
		0.16	1.30	0.34	0.020	0.007	0.04	0.09	0.03	0.0029	0.012
BO-Strangguss		V	CEV								
BOF-cc blooms		0.003	0.40								
Mechanické hodnoty-Mechanische Werte-Mechanical values											
B07 Tavba Schmelze	B06 Stav zkoušení Probezustand	C11 Mez kluzu Streckgrenze	C12 Mez pevnosti Zugfestigkeit	C13 Tažnost Bruchdehnung	C14 Kontrakce Bruchdehnung	B06 Stav zkoušení Probezustand	C83 Zkušební teplota Prüftemperatur	C40, C42 Zkouška rázem v ohybu Schlagarbeit			
T39961	+N	367	518	32,9	75,5						
B07 Tavba Schmelze	D68 Přehovazí zkoušky Stampfproben	D67 Oduhlišení Entkohlung	C64 Mikročistota Reinheitsgrad	C67 Velikost zrna Korngröße	C68 Tvrdost HB Hardness HB	C69 Vakuování Vakuumdegassing					
T39961	(EN 10263-1)	(max. / mm)	(DIN 50652)								
164 - 171 ano/ja/yes											



TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY
MORAVIA STEEL

A01 Druh dokumentu / Art der Prüfbescheinigung / Type of inspection document Inspekční certifikát 3.1 - Abnahmeprüfzeugnis 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004			
A01A08 Výrobní závod / Herstellerwerk / Manufacture TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic		Stránka / Seite / Page 2 / 2	
		A03 Číslo dokumentu / Bescheinigungsnummer / Document No. 2017/05/011679-MAR	
B07 Tavba Schmelze Heat No.	D02 UZ kontrola US Prüfung US test		
T39961 1008 EN 10228-3/1			
D01 Kontrola povrchu, tvaru a rozměru odpovídá objednávce. Die Kontrolle der Oberfläche, Form und Abmessung entspricht der Bestellung. Control of surface, shape and dimension corresponds to the order			
D06 Dodržena radioizotopická aktivita tavebního vzorku - max. 100 Bq/kg. Die radioisotopische Aktivität max. 100 Bq/kg wurde eingehalten. Radio - Isotopic activity was controlled in ladle sample, it was no higher than 100 Bq/kg.		A04 / Značka výrobce / Herstellungszusatzzeichen / Manufacturer's logo 	
Z01 Dodaný materiál odpovídá předpisu objednávky. Die obengenannten Erzeugnisse entsprechen den Bestimmungsvorschriften. Products conform with the prescription of order.			
Z03 Tento dokument byl elektronicky podepsán v souladu se zákonem č. 227/2000Sb. Dieses Dokument wurde mit elektronischer Unterschrift im Einklang mit dem Gesetz Nr. 227/2000Sg. versehen. This document was electronically according to Law No. 227/2000CoiI undersigned.			
Z02 Potvrdil -Der Werksachverständige -Expert : Ruzs Roman, Třinec: 29.05.2017		referent jakosti, nezávislý oprávněný zástupce Der Sachbearbeiter der Qualitätskontrolle für Freigabe und Atteste, unabhängiger berechtigter Vertreter Officer for Quality Inspection, Releasing and Attestation, independent authorized agent	

Příloha C Grafy tepelného zpracování



**STROJÍRNY A STAVBY
TRINEC**

Inspekční certifikát tepelného zpracování dle ČSN EN 10 204-3.1
Inspection certificate heat treatment report according to ČSN EN 10 204-3.1
Abnahmeprüfzeugnis Wärmebehandlung nach ČSN EN 10 204-3.1

Č.	Změna teploty [°C/h]	Teplota zlomu [°C]	Proděva [h]	Protokol číslo	Report No.	Protokoll Nr.	3677
No.	Temperature variation	Breakpoint	Holding time	Pec č.	Furnace No.	Ofen Nr.	V1
Nr.	Temperaturänderung	Wechsellpunkt	Haltezeit	Číslo diagramu	Diagram No.	Diagramm Nr.	V1_GRAF003677
1	90.0	620.0	1.0	Datum zahájení	Started	Beginndatum	7.1.2019 12:53
2	90.0	890.0	3.0	Datum ukončení	Finished	Endedatum	8.1.2019 7:30
3	180.0	200.0	0	Obsluha	Tender	Operator	Jiří Hota
4				Chl. médium	Cool. medium	Kühlmittel	vzduch/air/luft
5				Druh tepelného zpracování/Kind of heat treatment/Wärmebehandlungsart :			
6				normaliz. žhání a popouštění/normalizing and tempering/normalglühen und anlassen			
Č.	Pracovní číslo/pol.	Jakost oceli	Číslo tavby	Hmotnost	Číslo výkresu / Pozice / Rozměr	Počet kusů	Poznámka
No.	Job Number/Item	Material Quality	Heat No.	Weight	Drawing No. /Position /Dimension	Quantity	Note
Nr.	Werksnummer/pos.	Stahlgüte	Charge Nr.	Gewicht	Zeichnungsnummer /Position /Abmessung	Stückzahl	Bemerkung
1	20205061	S355JO	21371	3410	59234-0-590	75	TEPP111//09
2			39961			25	
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

Příloha : Diagram tepelného zpracování V1_GRAF003677

Enclosure : Diagram of heat treatment

Beilage : Diagramm der Wärmebehandlung

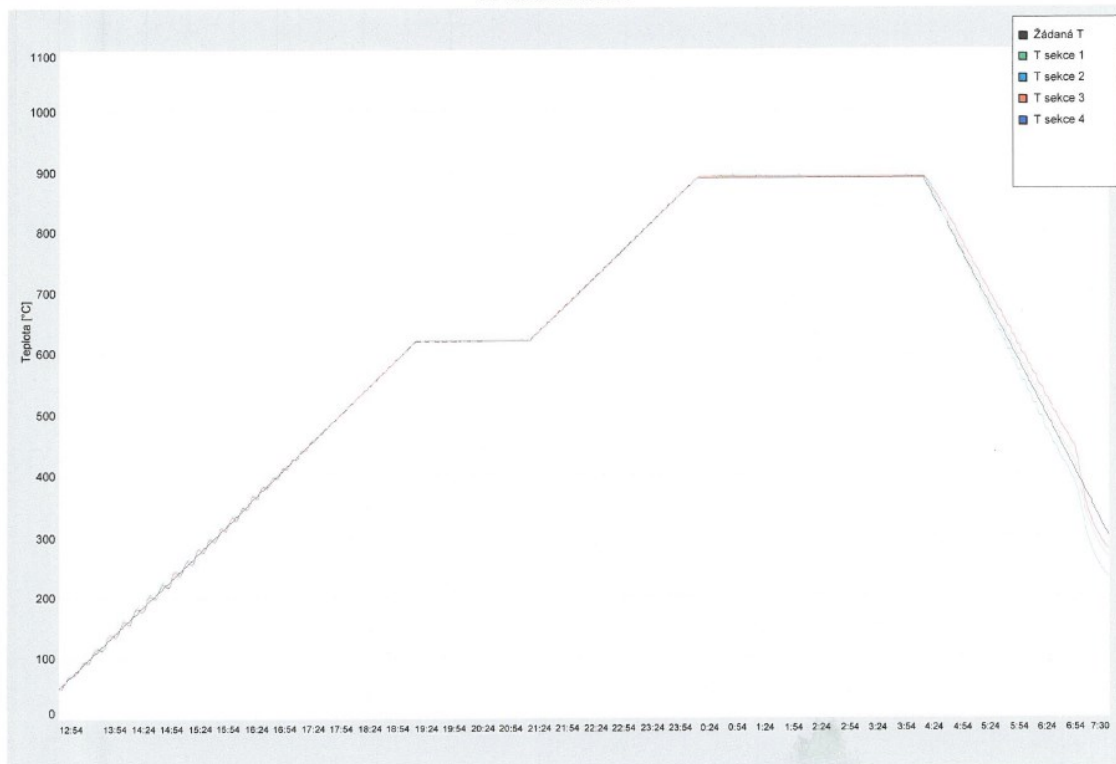
Datum / Date / Datum :

8.1.2019

Uvolnil / Issued by/Freigegeben :

Schválil / Approved by / Zugestimmt :

V1 GRAF003677





STROJÍRNY A STAVBY TRINEC

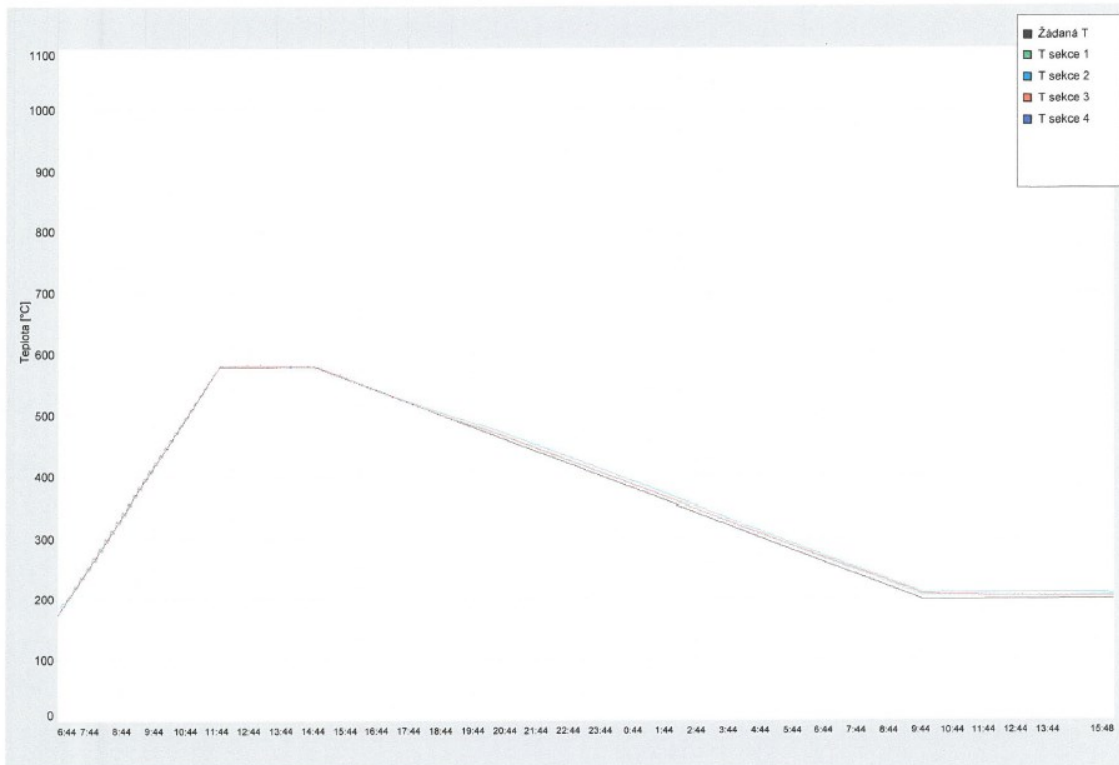
Inspekční certifikát tepelného zpracování dle ČSN EN 10 204-3.1
Inspection certificate heat treatment report according to ČSN EN 10 204-3.1
Abnahmeprüfzeugnis Wärmebehandlung nach ČSN EN 10 204-3.1

Č.	Změna teploty [°C/h]	Teplota zlomu [°C]	Prodleva [h]	Protokol číslo	Report No.	Protokoll Nr.	3705
No.	Temperature variation	Breakpoint	Holding time	Pec č.	Furnace No.	Ofen Nr.	V1
Nr.	Temperaturänderung	Wechsellpunkt	Haltezeit	Číslo diagramu	Diagram No.	Diagramm Nr.	V1_GRAF003705
1	80.0	580.0	3.0	Datum zahájení	Started	Beginndatum	18.1.2019 6:43
2	40.0	200.0	4.0	Datum ukončení	Finished	Endedatum	21.1.2019 11:27
3				Obsluha	Tender	Operator	Jiří Hota
4				Chl. médium	Cool.medium	Kühlmittel	pec/furnace/ofen
5				Druh tepelného zpracování/Kind of heat treatment/Wärmebehandlungsart :			
6				žihání na odstranění prnutí/stress relieving/spannungsarmglühen			
Č.	Pracovní číslo/pol.	Jakost oceli	Číslo tavby	Hmotnost	Číslo výkresu /Pozice /Rozměr	Počet kusů	Poznámka
No.	Job Number/Item	Material Quality	Heat No.	Weight	Drawing No. /Position /Dimension	Quantity	Note
Nr.	Werksnummer/pos.	Stahlgüte	Charge Nr.	Gewicht	Zeichnungsnummer /Position /Abmessung	Stückzahl	Bemerkung
1	20205061	S355JO	21371	1800	59324-6-590	150	1118/09
2			39961			50	
3	RYBA			100	ZK	2	
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

Příloha : Diagram tepelného zpracování V1_GRAF003705
Enclosure : Diagram of heat treatment
Beilage : Diagramm der Wärmebehandlung

Datum / Date / Datum : 21.1.2019
Uvolnil / Issued by/Freigegeben :
Schválil / Approved by / Zugestimmt :

V1 GRAF003705





STROJÍRNY A STAVBY TRINEC

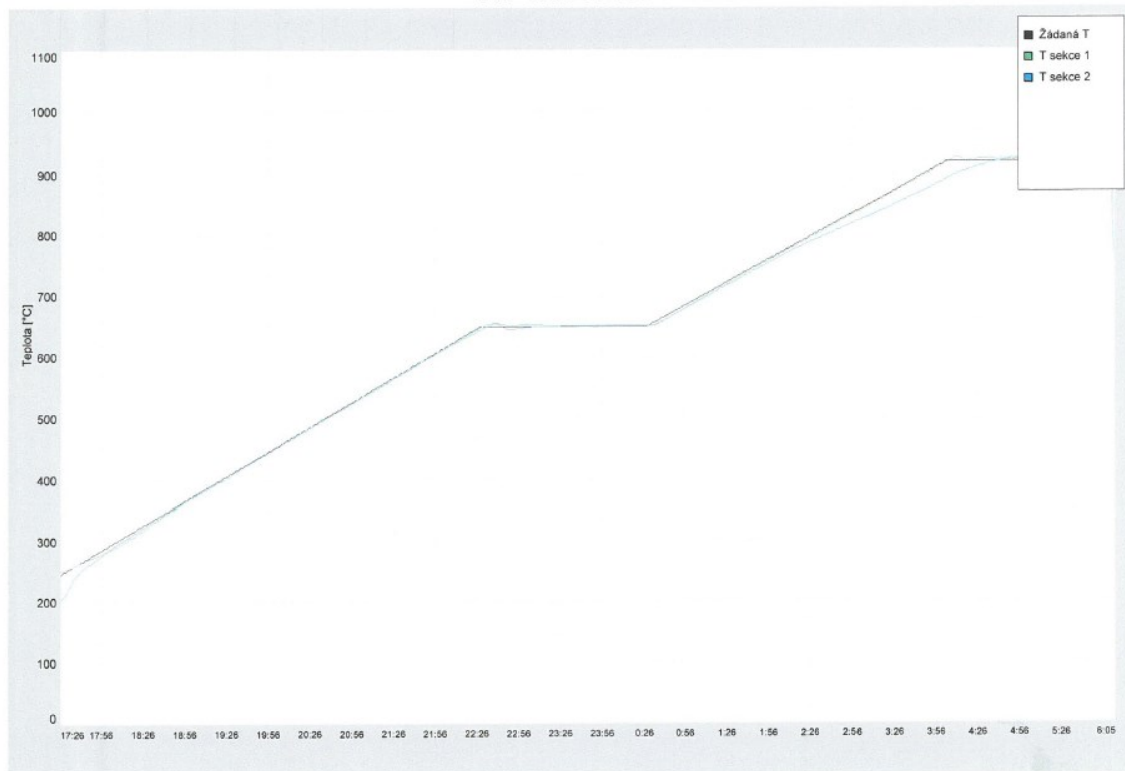
Inspekční certifikát tepelného zpracování dle ČSN EN 10 204-3.1
Inspection certificate heat treatment report according to ČSN EN 10 204-3.1
Abnahmeprüfzeugnis Wärmebehandlung nach ČSN EN 10 204-3.1

Č.	Změna teploty [°C/h]	Teplota zlomu [°C]	Prodleva [h]	Protokol číslo	Report No.	Protokoll Nr.	3708
No.	Temperature variation	Breakpoint	Holding time	Pec č.	Furnace No.	Ofen Nr.	V13
Nr.	Temperaturänderung	Wechsellpunkt	Haltezeit	Číslo diagramu	Diagram No.	Diagramm Nr.	V13_GRAF003708
1	80.0	650.0	2.0	Datum zahájení	Started	Beginndatum	21.1.2019 17:25
2	75.0	920.0	2.0	Datum ukončení	Finished	Endedatum	22.1.2019 6:19
3				Obsluha	Tender	Operator	Milan Olszowy
4				Chl. médium	Cool.medium	Kühlmittel	voda/water/wasser
5				Druh tepelného zpracování/Kind of heat treatment/Wärmebehandlungsart :			
6				ohřev ke kalení/warm up quenching/erwärmung für härten			
Č.	Pracovní číslo/pol.	Jakost oceli	Číslo tavby	Hmotnost	Číslo výkresu /Pozice / Rozměr	Počet kusů	Poznámka
No.	Job Number/Item	Material Quality	Heat No.	Weight	Drawing No. /Position /Dimension	Quantity	Note
Nr.	Werksnummer/pos.	Stahlgüte	Charge Nr.	Gewicht	Zeichnungsnummer /Position /Abmessung	Stückzahl	Bemerkung
1	20205061	S355JO	21371	1200	59234-6.590	150	TEPP1118/09
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

Příloha : Diagram tepelného zpracování V13_GRAF003708
Enclosure : Diagram of heat treatment
Beilage : Diagramm der Wärmebehandlung

Datum / Date / Datum : 22.1.2019
Uvolnil / Issued by/Freigegeben :
Schválil / Approved by / Zugestimmt :

V13 GRAF003708





STROJIRNY A STAVBY TRINEC

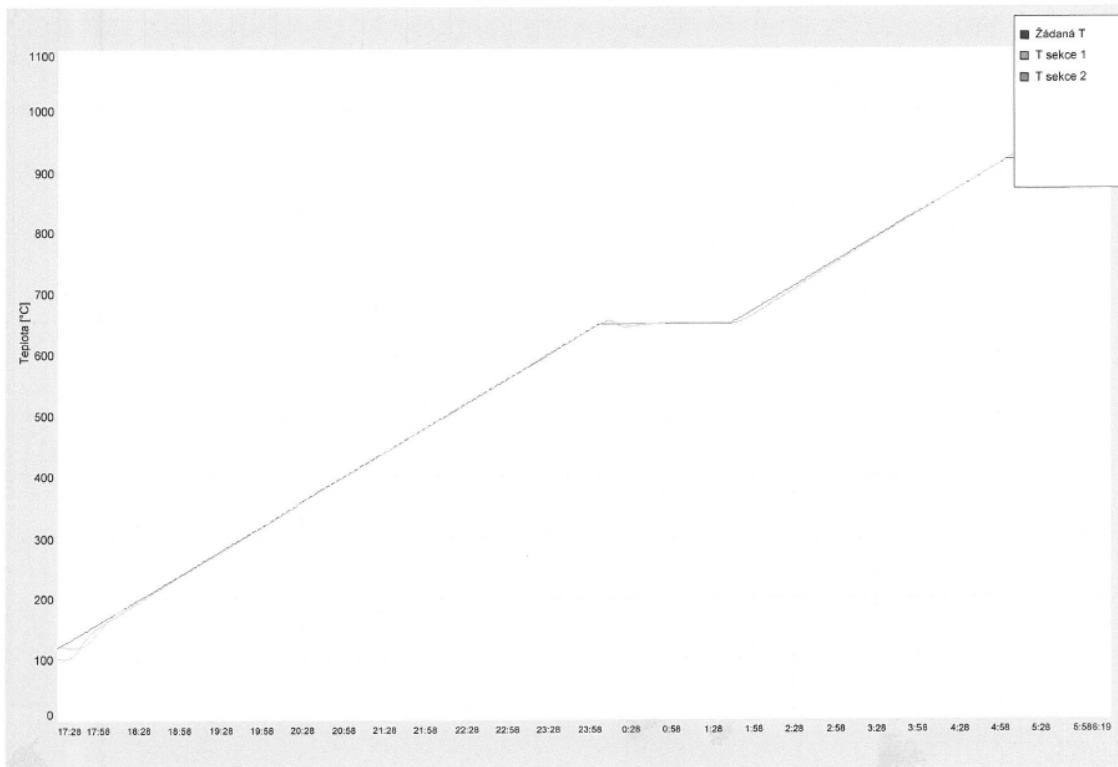
Inspekční certifikát tepelného zpracování dle ČSN EN 10 204-3.1
Inspection certificate heat treatment report according to ČSN EN 10 204-3.1
Abnahmeprüfzeugnis Wärmebehandlung nach ČSN EN 10 204-3.1

Č.	Změna teploty [°C/h]	Teplota zlomu [°C]	Prodleva [h]	Protokol číslo	Report No.	Protokol Nr.	3709
No.	Temperature variation	Breakpoint	Holding time	Pec č.	Furnace No.	Ofen Nr.	V12
Nr.	Temperaturänderung	Wechsellpunkt	Haltezeit	Číslo diagramu	Diagram No.	Diagramm Nr.	V12_GRAF003709
1	80.0	650.0	1.6	Datum zahájení	Started	Beginndatum	21.1.2019 17:27
2	80.0	920.0	1.5	Datum ukončení	Finished	Endedatum	22.1.2019 6:19
3				Obsluha	Tender	Operator	Milan Olszowy
4				Chl. médium	Cool.medium	Kühlmittel	voda/water/wasser
5				Druh tepelného zpracování/Kind of heat treatment/Wärmebehandlungsart :			
6				ohřev ke kalení/warm up quenching/erwärmung für härten			
Č.	Pracovní číslo/pol.	Jakost oceli	Číslo tavby	Hmotnost	Číslo výkresu /Pozice /Rozměr	Počet kusů	Poznámka
No.	Job Number/Item	Material Quality	Heat No.	Weight	Drawing No. /Position /Dimension	Quantity	Note
Nr.	Werknummer/pos.	Stahlgüte	Charge Nr.	Gewicht	Zeichnungsnummer /Position /Abmessung	Stückzahl	Bemerkung
1	20205061	S355JO	39961	400	59234-6.590	50	TEPP1118/09
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

Příloha : Diagram tepelného zpracování V12_GRAF003709
Enclosure : Diagram of heat treatment
Beilage : Diagramm der Wärmebehandlung

Datum / Date / Datum : 22.1.2019
Uvolnil / Issued by/Freigegeben :
Schválil / Approved by / Zugestimmt :

V12 GRAF003709





STROJÍRNY A STAVBY TŘINEC

Inspekční certifikát tepelného zpracování dle ČSN EN 10 204-3.1
Inspection certificate heat treatment report according to ČSN EN 10 204-3.1
Abnahmeprüfzeugnis Wärmebehandlung nach ČSN EN 10 204-3.1

Č.	Změna teploty [°C/h]	Teplota zlomu [°C]	Prodleva [h]	Protokol číslo	Report No.	Protokoll Nr.	3711
No.	Temperature variation	Breakpoint	Holding time	Pec č.	Furnace No.	Ofen Nr.	V13
Nr.	Temperaturänderung	Wechsellpunkt	Haltezeit	Číslo diagramu	Diagram No.	Diagramm Nr.	V13_GRAF003711
1	80.0	650.0	4.0	Datum zahájení	Started	Beginndatum	22.1.2019 7:21
2				Datum ukončení	Finished	Enddatum	22.1.2019 16:04
3				Obsluha	Tender	Operator	Jiří Hota
4				Chl. médium	Cool.medium	Kühlmittel	vzduch/air/luft
5				Druh tepelného zpracování/Kind of heat treatment/Wärmebehandlungsart :			
6				popouštění po kalení/tempering after quenching/anlassen nach dem härten			
Č.	Pracovní číslo/pol.	Jakost oceli	Číslo tavby	Hmotnost	Číslo výkresu / Pozice / Rozměr	Počet kusů	Poznámka
No.	Job Number/Item	Material Quality	Heat No.	Weight	Drawing No. /Position /Dimension	Quantity	Note
Nr.	Werknummer/pos.	Stahlgüte	Charge Nr.	Gewicht	Zeichnungsnummer /Position /Abmessung	Stückzahl	Bemerkung
1	20205061	S355JO	21371	1200	59234-6.590	150	TEPP1118/09
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

Příloha : Diagram tepelného zpracování V13_GRAF003711

Enclosure : Diagram of heat treatment

Beilage : Diagramm der Wärmebehandlung

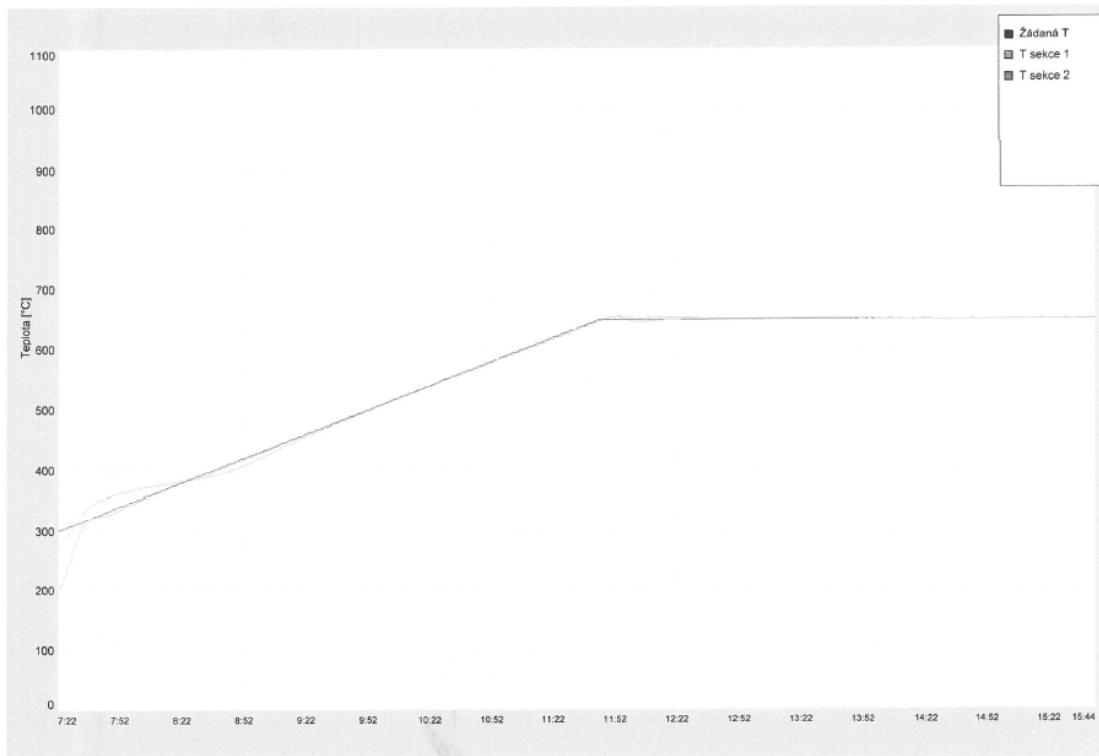
Datum / Date / Datum :

22.1.2019

Uvolnil / Issued by/Freigegeben :

Schválil / Approved by / Zugestimmt :

V13_GRAF003711





STROJÍRNY A STAVBY TŘINEC

Inspekční certifikát tepelného zpracování dle ČSN EN 10 204-3.1
Inspection certificate heat treatment report according to ČSN EN 10 204-3.1
Abnahmeprüfzeugnis Wärmebehandlung nach ČSN EN 10 204-3.1

Č.	Změna teploty [°C/h]	Teplota zlomu [°C]	Prodleva [h]	Protokol číslo	Report No.	Protokoll Nr.	3712
No.	Temperature variation	Breakpoint	Holding time	Pec č.	Furnace No.	Ofen Nr.	V12
Nr.	Temperaturänderung	Wechselpunkt	Haltezeit	Číslo diagramu	Diagram No.	Diagramm Nr.	V12_GRAF003712
1	80.0	650.0	4.0	Datum zahájení	Started	Beginndatum	22.1.2019 7:22
2				Datum ukončení	Finished	Endedatum	22.1.2019 16:04
3				Obsluha	Tender	Operator	Milan Olszowy
4				Chl. médium	Cool.medium	Kühlmittel	vzduch/air/luft
5				Druh tepelného zpracování / Kind of heat treatment / Wärmebehandlungsart :			
6				popouštění po kalení / tempering after quenching / anlassen nach dem härten			
Č.	Pracovní číslo/pol.	Jakost oceli	Číslo tavby	Hmotnost	Číslo výkresu / Pozice / Rozměr	Počet kusů	Poznámka
No.	Job Number/Item	Material Quality	Heat No.	Weight	Drawing No. /Position /Dimension	Quantity	Note
Nr.	Werksnummer/pos.	Stahlgüte	Charge Nr.	Gewicht	Zeichnungsnummer /Position /Abmessung	Stückzahl	Bemerkung
1	20205061	S355JO	39961	400	59234-6.590	50	TEPP1118/09
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

Příloha : Diagram tepelného zpracování V12_GRAF003712
Enclosure : Diagram of heat treatment
Beilage : Diagramm der Wärmebehandlung

Datum / Date / Datum : 22.1.2019
Uvolnil / Issued by/Freigegeben :
Schválil / Approved by / Zugestimmt :

V12 GRAF003712

